

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN EL COMPORTAMIENTO  
ESTRUCTURAL PARA UNA EDIFICACIÓN APORTICADA CONVENCIONAL DE  
CONCRETO REFORZADO EN COLOMBIA**



**FREDDY MIGUEL OSPINO OSPINO  
JORGE MARIO MARTÍNEZ GAMERO**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA  
FACULTAD DE INGENIRIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
TRABAJO DE GRADO  
BARRANQUILLA**

**2021**

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN EL COMPORTAMIENTO  
ESTRUCTURAL PARA UNA EDIFICACIÓN APORTICADA CONVENCIONAL DE  
CONCRETO REFORZADO EN COLOMBIA**

**FREDDY MIGUEL OSPINO OSPINO**

**JORGE MARIO MARTÍNEZ GAMERO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ASESORES:**

**SEBASTIÁN QUINTERO MERCHÁN MSc**

**HEIDIS CANO CUADRO PhD**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**FACULTAD DE INGENIRIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**BARRANQUILLA**

**2021**

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

---

---

**PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**JURADO**

---

**JURADO**

### **Dedicatoria**

Este proyecto de grado se lo dedicamos principalmente a Dios. A nuestros padres, que nos han brindado su apoyo incondicional en nuestras vidas y formación académica, finalmente a nuestras familias ya que han sido una fuente de motivación esencial para la realización de este trabajo.

### **Agradecimiento**

Gracias Dios por permitirnos realizar este proyecto, ya que nos ha nutrido en conocimiento y nos ha permitido aplicarlo. Agradecemos enormemente a nuestros tutores Sebastián Quintero y Heidis Cano, por su dedicación y paciencia en todo el proceso. A la Universidad de la Costa por las herramientas brindadas (Bases de datos, plataformas de comunicación, Laboratorios).

Jorge Martínez Gamero y Freddy Ospino Ospino.

### Resumen

La corrosión es un fenómeno que afecta la calidad de los materiales empleados en la construcción, lo cual ocasiona pérdidas desde el punto de vista económico, así como también afecta la funcionalidad de una estructura, generando posibles problemas de seguridad a las personas o usuarios. Por lo anterior, es importante considerar este fenómeno al momento de diseñar y construir edificaciones. En este trabajo se diseñó una estructura aporticada cumpliendo con requisitos de la norma colombiana actual NSR-10 realizado en SAP 2000, así mismo, por medio de correlaciones determinadas y métodos para el estudio de la corrosión del acero embebido en el concreto los cuales involucran variables como; espesor de recubrimiento, calidad del hormigón, presencia de cloruro en el ambiente, porosidad del concreto y la intensidad de corrosión  $I_{corr}$ . Se calculó el grado de corrosión de la armadura para un periodo de 50 años. Los resultados muestran para dicho tiempo un porcentaje de corrosión del 2.37% (Pérdida de masa de la armadura) y una pérdida de la resistencia a la compresión  $f_c$  de los elementos estructurales del 2.45%. Se realiza un análisis desde el punto de vida estructural sobre la afectación que podrían sufrir la estructura por los efectos de la corrosión para un estudio de caso particular.

**Palabras clave:** Corrosión, Resistencia a la compresión, modelación SAP, grado de afectación, FHE, Aportico convencional.

**Abstract.**

Corrosion is a phenomenon that affects the quality of the materials used in construction, which causes losses from an economic point of view, as well as affects the functionality of a structure, generating possible safety problems for people or users. Therefore, it is important to consider this phenomenon when designing and constructing buildings. In this work a porticoed structure was designed complying with the requirements of the current Colombian standard NSR-10 carried out in SAP 2000, likewise, by means of determined correlations and methods for the study of the corrosion of steel embedded in concrete which involve variables What; coating thickness, concrete quality, presence of chloride in the environment, concrete porosity and the intensity of corrosion  $I_{corr}$ . The degree of corrosion of the armor was calculated for a period of 50 years. The results show for said time a percentage of corrosion of 2.37% (Loss of mass of the reinforcement) and a loss of the resistance to compression  $f_c$  of the structural elements of 2.45%. An analysis is carried out from the structural life point on the affection that the structure could suffer from the effects of corrosion for a particular case study.

**Keywords:** Corrosion, Compressive strength, SAP modeling, degree of affection, FHE, Conventional Aportico.





5.6.4.	Resistencia a la fluencia del acero $f_y$ .....	64
5.6.5.	Módulo de elasticidad del refuerzo. ....	64
5.7.	Características de los materiales usados en la estructura.....	64
6.	Diseños arquitectónicos, análisis y diseño estructural. ....	65
6.1	Diseños arquitectónicos edificación de 5 niveles.....	65
6.1.1	Diseños de fachada. ....	65
6.1.2	Planta arquitectónica pisos 1-2-3,-4 y 5.....	66
6.1.3	Planta estructural.....	67
6.2	Predimensionamiento de Elementos Estructurales.....	68
6.2.1	Predimensionamiento de Vigas.....	68
6.2.2	Predimensionamiento de viguetas. ....	72
6.2.3	Predimensionamiento de losa.....	72
6.2.4	Predimensionamiento de elementos tipo columnas.....	72
6.2.5	Secciones transversales Predimensionadas.....	73
6.2.6	Secciones alternativas por no cumplimiento de derivas .....	74
6.3	Análisis de cargas según lineamientos de la NSR-10. ....	74
6.4	Análisis por el método Fuerza Horizontal Equivalente, FHE.....	78
6.4.1	Cálculo de TC y TL.....	80
6.4.2	Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía R. ....	80
6.4.3	Espectro de aceleración $S_a$ .....	81
6.4.4	Periodo de la estructura.....	82
6.4.5	Cálculo del valor de $S_a$ . ....	83
6.5	Modelación, SAP 2000.....	83
6.5.1	Ventana principal SAP 2000 20. ....	84
6.5.2	Creación de plantilla. ....	84
6.5.3	Definición de materiales. ....	85
6.5.4	Definición de secciones de elementos. ....	86
6.5.5	Definición de tipos de cargas. ....	87
6.5.6	Dibujo del modelo sobre la plantilla inicialmente creada.....	87
6.5.7	Asignación de restricciones en apoyo de columnas. ....	88
6.5.8	Asignación de diafragma rígido. ....	89
6.5.9	Asignación de cargas en secciones de área ( $kN/m^2$ ). ....	89
6.6	Chequeo de derivas. ....	90
6.6.1	Combinaciones de cargas para el análisis de derivas. ....	92
6.6.2	Chequeo de derivas, secciones de Predimensionamiento .....	92
6.6.3	Chequeo de derivas, nuevas secciones. ....	94
6.7	Diseño de los elementos estructurales.....	96

6.7.1	Combinaciones de cargas para el diseño. ....	97
6.7.2	Ejecución del diseño. ....	98
6.7.3	Diseño a flexión para verificación del buen funcionamiento del SAP 2000. ....	99
6.7.4	Diseño a Cortante para verificación del buen funcionamiento del SAP 2000. ....	105
6.7.5	Diseño a flexión, cortante en elementos tipo vigas y columnas ....	111
6.7.6	Resumen del diseño estructural en Vigas ....	112
6.7.7	Resumen del diseño estructural de columnas. ....	117
7	Determinación del grado de corrosión y aplicación de correlación. ....	136
7.1.	Determinación de la porosidad del concreto. ....	136
7.2.	Diagnóstico de corrosión, considerando la variable espesor de recubrimiento. ....	136
7.3.	Diagnóstico de corrosión, considerando la variable Calidad de Hormigón. ....	137
7.4.	Determinación de la intensidad de corrosión icorr. ....	138
7.5.	Determinación de la intensidad de corrosión icorr. ....	139
7.6.	Cálculo del porcentaje de pérdida de acero de la estructura en lapso de 50 ....	139
7.7.	Aplicación de la correlación, pérdida de resistencia y grado de corrosión. ....	141
8.	Efectos de la corrosión desde el punto de vista estructural. ....	141
8.1.	Análisis de derivas considerando el cambio producto de la corrosión. ....	143
8.2.	Análisis Diagramas de iteración de columnas considerando la corrosión. ....	145
8.3.	Análisis en la variación de los resultados de diseño a flexión de vigas y flexo-compresión de elementos verticales. ....	151
8.4.	Comparación entre la capacidad de resistencia de vigas en condiciones normales y considerando el fenómeno de corrosión. ....	153
8.4.1.	Cálculo de Capacidad de la sección en condiciones iniciales. ....	154
8.4.2.	Chequeo de Capacidad de la sección Considerando los cambios por corrosión. ....	156
	Materiales. ....	156
9.	Efectos de la corrosión desde el punto de vista estructural recubrimiento $r=1\text{cm}$ . ....	157
9.2.	Análisis de derivas considerando el cambio producto de la corrosión para estructura con recubrimientos de 1cm. ....	160
9.3.	Análisis Diagramas de iteración de columnas considerando el fenómeno de la corrosión y recubrimiento al estribo de 1cm. ....	161
9.4.	Análisis de diseño a flexión y flexo-compresión, considerando Recubrimiento $R=1\text{cm}$ . ..	162
9.5.	Análisis de capacidad de resistencia de vigas considerando la corrosión y $R=1\text{cm}$ . ....	164
10.	Conclusiones ....	165
	Recomendaciones. ....	167
	Referencias. ....	168
	Anexos ....	172

### Lista de tablas y figuras

#### Tablas

<b>Tabla 1.1.</b> Métodos para analizar la corrosión en el acero embebido en el concreto.....	33
<b>Tabla 4.2.</b> Características en común de los elementos ensayados encontrados en diferentes investigaciones. ....	51
<b>Tabla 4.3.</b> Datos de consolidado de Porcentaje de nivel de corrosión y porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión. ....	52
<b>Tabla 6.4.</b> Predimensionamiento de vigas dependiendo de ciertas condiciones de apoyo. tabla de la NSR-10 Titulo C. ....	69
<b>Tabla 6.5.</b> Relación entre diferentes ciudades de Colombia y la zona de amenaza sísmica. ....	70
<b>Tabla 6.6.</b> Grados de capacidad de disipación de energía en función de la amenaza sísmica establecidos. ....	71
<b>Tabla 6.7.</b> Datos de entrada, necesarios para realizar el análisis estructural. ....	75
<b>Tabla 6.8.</b> Cálculo del peso de muros divisorios en cada uno de los niveles de la edificación. ....	75
<b>Tabla 6.9.</b> Cálculo del peso de elementos No estructurales, de acuerdo con la NSR-10 título B. ....	76
<b>Tabla 6.10.</b> Cálculo del peso de elementos estructurales, de acuerdo con las dimensiones definidas. ....	77
<b>Tabla 6.11.</b> Cálculo del peso de elementos estructurales y no estructurales en unidades de kN.....	77
<b>Tabla 6.12.</b> Cálculo del peso por cada piso de la edificación, se incluye elementos estructurales y no estructurales. ....	78
<b>Tabla 6.13.</b> Datos de entrada requeridos para el análisis por fuerza horizontal equivalente FHE. ....	79
<b>Tabla 6.14.</b> Datos de pesos por cada piso y alturas de entrepiso, FHE.....	79
<b>Tabla 6.15.</b> Parámetros sísmicos para el análisis por FHE, datos obtenidos empleando criterios de la NSR-10 título A. ....	80
<b>Tabla 6.16.</b> Cálculo de límites de zona de periodos cortos $T_c$ y periodos largos $T_L$ . ....	80
<b>Tabla 6.17.</b> Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía $R$ . ....	80
<b>Tabla 6.18.</b> Cálculo del espectro de aceleración horizontal, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad para un periodo dado. ....	81
<b>Tabla 6.19.</b> Resultado cálculo de Periodo natural de la estructura. ....	83
<b>Tabla 6.20.</b> Valor del espectro de aceleración, expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad.....	83
<b>Tabla 6.21.</b> Chequeo de derivas, deriva máxima según NSR-10. ....	91
<b>Tabla 6.22.</b> Análisis de derivas secciones Predimensionadas (1.2D+1Sx+1L).....	94
<b>Tabla 6.23.</b> Análisis de derivas Secciones de dadas (1.2D+1Sx+1L). ....	96
<b>Tabla 6.24.</b> Datos de entrada para ejecutar el modelo en SAP 2000. ....	101
<b>Tabla 6.25.</b> Datos de entrada para diseño a cortante. ....	107

<b>Tabla 6.26.</b> Cálculo de las cantidades de acero de columnas de la estructura dadas por el diseño, los resultados están en términos de masas kg por cada tipo de barra.....	134
<b>Tabla 6.27.</b> Cálculo de las cantidades de acero de vigas de la estructura dadas por el diseño, los resultados están en términos masas kg por cada tipo de barra. ....	135
<b>Tabla 7.28.</b> Niveles de corrosión para diferentes rangos de intensidad icorr. ....	139
<b>Tabla 7.29.</b> Cálculo del porcentaje de pérdida de sección de las barras de acero para el lapso de 50 años según el grado de intensidad de corrosión. ....	140
<b>Tabla 7.30.</b> Cálculo del porcentaje de pérdida de masa de toda la estructura para un lapso de 50 años. ....	140
<b>Tabla 8.31.</b> Análisis de derivas, condiciones iniciales y finales en cuanto al efecto de la corrosión. ....	144
<b>Tabla 8.32.</b> Error relativo porcentual de derivas de pisos, condiciones Iniciales y Finales considerando la corrosión. ....	144
<b>Tabla 8.33.</b> Resultados de cálculos de Mn(Inicial) y Mn(Final) para vigas Tipo que conforman la estructura.....	157
<b>Tabla 9.34.</b> Grado de corrosión de la estructura, periodo de 50 años y R: 1cm.....	158
<b>Tabla 9.35.</b> Análisis de derivas, condiciones iniciales y finales por afectaciones de la corrosión. ...	160
<b>Tabla 9.36.</b> Error relativo porcentual de derivas de pisos, condiciones Iniciales y Finales considerando la corrosión. ....	160
<b>Tabla 9.37.</b> Resultados de cálculos de Mn(Inicial) y Mn(Final) para vigas Tipo que conforman la estructura.....	164

## Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Estructuras corroídas en Barranquilla. ....	21
<b>Figura 1.2.</b> Antes y después de corrosión uniforme.. ....	25
<b>Figura 1.3.</b> Antes y después de corrosión localizada.....	25
<b>Figura 1.4.</b> Antes y después de corrosión galvánica.....	26
<b>Figura 1.5.</b> Antes y después Corrosión Bajo tensión.....	27
<b>Figura 1.6.</b> Antes y después Corrosión Erosión.....	27
<b>Figura 1.7.</b> Antes y Después Fenómeno de Dealeado. ....	28
<b>Figura 1.8.</b> Antes y después Fragilización por hidrogeno.....	29
<b>Figura 1.9.</b> Antes y después Corrosión intergranular. ....	30
<b>Figura 1.10.</b> Sistema de corrosión acelerada.....	32
<b>Figura 1.11.</b> Sistema de marco, vista en 3D y 2D. Fuente: Elaboración propia.....	35
<b>Figura 1.12.</b> Espectro de aceleración.....	37

<b>Figura 3.13.</b> Evaluación de la corrosión por carbonatación.....	43
<b>Figura 3.14</b> Evaluación de la corrosión por cloruros solubles. ....	44
<b>Figura 3.15.</b> Espesor de recubrimiento y la corrosión.....	45
<b>Figura 3.16.</b> Calidad del hormigón y la corrosión.....	46
<b>Figura 3.17.</b> Diagnostico por velocidad de corrosión.....	47
<b>Figura 3.18.</b> Diagnostico por potencial.....	48
<b>Figura 3.19.</b> Resistividad del hormigón y la corrosión.....	49
<b>Figura 3.20.</b> Evaluación por corrosión. ....	50
<b>Figura 4.21.</b> Consolidado de porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. ....	54
<b>Figura 5.22.</b> Ubicación de la zona del proyecto.....	55
<b>Figura 5.23.</b> Coeficiente de aceleración pico efectivo según el grado de amenaza sísmica. ....	57
<b>Figura 5.24.</b> Datos de temperatura media, máxima y mínima anual registradas en la ciudad de Santa Marta desde 1972 hasta 2019.....	58
<b>Figura 5.25.</b> Datos de precipitación total anual registradas en la ciudad de Santa Marta desde 1972 hasta 2019. ....	59
<b>Figura 5.26.</b> Datos de humedad relativa promedio anual registradas en la ciudad de Santa Marta desde 1972 hasta 2019.....	60
<b>Figura 5.27.</b> Serie de tiempo para los datos de salinidad en el ambiente registradas en la ciudad de Santa durante el periodo de enero 2014 – diciembre 2015. ....	60
<b>Figura 5.28.</b> Salinidad de agua superficial en las estaciones de muestreo en departamentos de la costa caribe colombiana .....	62
<b>Figura 5.29.</b> Distribución de sistemas constructivos usados para VIS desde el segundo trimestre de 2012 hasta el cuarto trimestre de 2015.. ....	63
<b>Figura 6.30.</b> Plano arquitectónico de edificación 5 niveles. ....	65
<b>Figura 6.31.</b> Plano arquitectónico de edificación 5 niveles. ....	66
<b>Figura 6.32.</b> Planta arquitectónica Piso 1- 2-3-4 Y 5. ....	67
<b>Figura 6.33.</b> Distribución inicial de planta estructural Piso 1-2-3-4 Y 5.....	68
<b>Figura 6.34.</b> Dimensiones Predimensionadas de vigas y columnas. ....	73
<b>Figura 6.35.</b> Bosquejo de losa e:5cm .....	73
<b>Figura 6.36.</b> Dimensiones de vigas y columnas. ....	74
<b>Figura 6.37.</b> Bosquejo de losa e:5cm .....	74
<b>Figura 6.38.</b> Espectro de aceleración edificación en estudio. . ....	82
<b>Figura 6.39.</b> Ventana principal del software. ....	84
<b>Figura 6.40.</b> Creación de plantilla. ....	85
<b>Figura 6.41.</b> Definición de materiales.....	86
<b>Figura 6.42.</b> Definición de secciones vigas y columnas.....	86

<b>Figura 6.43.</b> Definición de secciones losa. ....	87
<b>Figura 6.44.</b> Definición de cargas. ....	87
<b>Figura 6.45.</b> Vistas en 3D de la estructura. ....	88
<b>Figura 6.46.</b> Vista en planta de la estructura. ....	88
<b>Figura 6.47.</b> Vista en perfil XZ. ....	88
<b>Figura 6.48.</b> Asignación de restricciones. ....	89
<b>Figura 6.49.</b> Asignación de diafragma rígido. ....	89
<b>Figura 6.50.</b> Asignación de cargas piso1-2-3 y 4. ....	90
<b>Figura 6.51.</b> Asignación de cargas piso 5. ....	90
<b>Figura 6.52.</b> Ilustración de un pórtico deformado por acción de fuerzas laterales. ....	91
<b>Figura 6.53.</b> Pórtico seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas en Predimensionamiento. ....	93
<b>Figura 6.54.</b> Derivas totales para el pórtico C. ....	94
<b>Figura 6.55.</b> Pórtico seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. ....	95
<b>Figura 6.56.</b> Derivas totales para el pórtico C. ....	96
<b>Figura 6.57.</b> Parámetros de diseño para estructura de concreto reforzado. ....	97
<b>Figura 6.58.</b> Combinaciones de carga para diseño estructural. ....	98
<b>Figura 6.59.</b> Diseño estructural ejecutado. ....	99
<b>Figura 6.60.</b> Diagramas de momento para <b>pórtico C</b> . ....	99
<b>Figura 6.61.</b> Diseño pórtico C. ....	100
<b>Figura 6.62.</b> Resultados del diseño a flexión de la viga seleccionada, pórtico C. ....	101
<b>Figura 6.63.</b> Diagramas de cortante para <b>pórtico C</b> . ....	105
<b>Figura 6.64.</b> Resultados del diseño a flexión de la viga seleccionada, pórtico C. ....	106
<b>Figura 6.65.</b> Diagrama de cortante de viga 45x50. ....	107
<b>Figura 6.66.</b> Planta estructural, piso 2, condiciones más críticas de elementos tipo viga. ....	111
<b>Figura 6.67.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga D de la planta estructural. ....	112
<b>Figura 6.68.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga C de la planta estructural. ....	112
<b>Figura 6.69.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga B de la planta estructural. ....	113
<b>Figura 6.70.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga A de la planta estructural. ....	113
<b>Figura 6.71.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 1 de la planta estructural. ....	113
<b>Figura 6.72.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 2 de la planta estructural. ....	114

<b>Figura 6.73.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 3 de la planta estructural. ....	114
<b>Figura 6.74.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 4 de la planta estructural. ....	115
<b>Figura 6.75.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 1 de la planta estructural. ....	115
<b>Figura 6.76.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 2 de la planta estructural. ....	116
<b>Figura 6.77.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 3 de la planta estructural. ....	116
<b>Figura 6.78.</b> Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta de borde de la planta estructural. ....	117
<b>Figura 6.79.</b> Pórtico C Columna más crítica, análisis en SAP 2000 .....	117
<b>Figura 6.80.</b> Cuantía de diseño requerida, calculado en SAP 2000 20. ....	118
<b>Figura 6.81.</b> Diseño del refuerzo longitudinal de columnas (As). ....	119
<b>Figura 6.82.</b> Diseño del refuerzo Transversal de columnas (Av/S). ....	121
<b>Figura 6.83</b> Requisitos para el armado sismo resistente de columnas en DMO. ....	122
<b>Figura 6.84.</b> Despiece de columna más crítica de acuerdo con el diseño en SAP 2000 y los requerimientos dados por la NSR-10. ....	123
<b>Figura 6.85.</b> Despiece de columna más crítica de acuerdo con el diseño en SAP 2000 y los requerimientos dados por la NSR-10. ....	125
<b>Figura 6.86.</b> Carga ultima Pu y momentos Últimos MUx MUy que llegan a la columna seleccionada del pórtico C, ....	127
<b>Figura 6.87.</b> Valores y diagrama de iteración nominal con Pu y My, ....	127
<b>Figura 6.88.</b> Valores y diagrama de iteración de diseño con Pu y My, ....	128
<b>Figura 6.89.</b> Valores y diagrama de iteración nominal con Pu y Mx, ....	128
<b>Figura 6.90.</b> Valores y diagrama de iteración de diseño con Pu y Mx, ....	129
<b>Figura 6.91.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño con Pu y Mx, ubicando el punto crítico. ....	130
<b>Figura 6.92.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño con Pu y My, ubicando el punto crítico. ....	131
<b>Figura 6.93.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño con Pu y Mx, ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. ....	132
<b>Figura 6.94.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño con Pu y My, ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. ....	133
<b>Figura 7.95. Nota.</b> Resultado Diagnóstico: Moderada probabilidad de corrosión. ....	137
<b>Figura 7.96.</b> Resultado Diagnóstico: Moderada probabilidad de corrosión. ....	138

<b>Figura 8.97.</b> Modificaciones de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto en.....	142
<b>Figura 8.98.</b> Derivas totales para el pórtico C, Condiciones iniciales.....	143
<b>Figura 8.99.</b> Derivas totales para el pórtico C, Condiciones Finales.....	143
<b>Figura 8.100.</b> Pórtico C Columna más crítica, para análisis en SAP 2000.....	145
<b>Figura 8.101.</b> Valores y diagrama de iteración nominal en condiciones de corrosión del elemento con $P_u$ y $M_y$ , .....	146
<b>Figura 8.102.</b> Valores y diagrama de iteración de diseño en condiciones de corrosión del elemento con $P_u$ y $M_y$ ,.....	146
<b>Figura 8.103.</b> Valores y diagrama de iteración nominal en condiciones de corrosión del elemento con $P_u$ y $M_x$ , .....	147
<b>Figura 8.104.</b> Valores y diagrama de iteración de diseño en condiciones de corrosión del elemento con $P_u$ y $M_x$ ,.....	147
<b>Figura 8.105.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño(condición inicial y final) con $P_u$ y $M_x$ , ubicando el punto crítico .....	148
<b>Figura 8.106.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con $P_u$ y $M_y$ , ubicando el punto crítico.....	149
<b>Figura 8.107.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con $P_u$ y $M_x$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura.....	150
<b>Figura 8.108.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con $P_u$ y $M_y$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura.....	151
<b>Figura 8.109.</b> Diseño a flexión y flexocompresión de elementos estructurales, condiciones Iniciales y finales. ....	152
<b>Figura 8.110.</b> Pórtico C Viga Critica seleccionada, análisis en SAP 2000.....	153
<b>Figura 8.111.</b> Diseño y despiece de Viga tipo C.....	154
<b>Figura 9.112.</b> Modificaciones de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto en SAP 2000.. .....	159
<b>Figura 9.113.</b> Pórtico C Columna más crítica, para análisis en SAP 2000.....	161
<b>Figura 9.114.</b> Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con $P_u$ y $M_y$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura.....	162
<b>Figura 9.115.</b> Diseño a flexión y flexocompresión de elementos estructurales, condiciones Iniciales y finales. ....	163
<b>Figura 9.116.</b> Pórtico C, para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas.....	200



### Glosario de Símbolos y Términos

**Pasivación.** La corrosión es una reacción química. En toda reacción química se generan productos de corrosión. Si los productos de corrosión se quedan en la superficie metálica del metal que se está corroyendo y dificulta la evolución de esta reacción, se está produciendo un fenómeno de pasivación (Molera-Sola, 1990).

**Carbonatación.** La carbonatación del hormigón (perdida del PH del concreto) se produce como consecuencia de la acción del dióxido de carbono tanto sobre el cemento como sobre la pasta de cemento. La carbonatación se puede producir de forma espontánea, por acción del dióxido de carbono atmosférico, o artificialmente bajo los efectos del dióxido de carbono a presión (Martin, 1996).

**Tensión.** Considérese un sólido en equilibrio estático bajo a la acción de un determinado sistema de fuerzas. Frecuentemente dichas fuerzas estarán producidas por el contacto con otros sólidos, y por tanto actuarán en la superficie del sólido. Pueden ser fuerzas concentradas o distribuciones de fuerzas. Además de las fuerzas en el contorno anteriores, pueden existir fuerzas en el dominio, (que actúan en el interior del sólido y tienen dimensiones de fuerza dividida por volumen), como por ejemplo la acción de la gravedad. Frecuentemente nos referiremos a todas estas acciones como cargas aplicadas o acciones exteriores en el sólido (Valladolid, 2014).

**Deformación.** Como su nombre indica, la deformación hace referencia a los cambios de forma del sólido. Sin necesidad de pensar en las causas o acciones que provocaron la deformación (Valladolid, 2014).

**Resistencia a la compresión.** La compresión se produce cuando sobre un cuerpo se aplican fuerzas que tienden a comprimir el elemento (Hibbeler R. , 2011). La resistencia a la compresión es la capacidad de un elemento de experimentar esfuerzos de compresión.

**SAP 2000.** El SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento de lo más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

Conocido por la flexibilidad en el tipo de estructuras que permite analizar, por su poder de cálculo y por la fiabilidad de los resultados, SAP2000 es la herramienta de trabajo diaria para varios ingenieros. La versatilidad en modelar estructuras permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales, estructuras marítimas y todo tipo de infraestructura que necesite ser analizada y dimensionada (CSI, 2020).

**Sistema de Pórticos.** Es un sistema estructural compuesto por un pórtico espacial, resistente a momento, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales (NSR, 2010).

## 1. Introducción

En las zonas costeras de Colombia las características ambientales obedecen al conjunto de parámetros físicos que involucra corrientes, vientos, variaciones de temperatura, salinidad y otros, (Invemar, 2001), lo cual interfiere en la durabilidad de las estructuras de concreto armado que se encuentran en esta parte del territorio. Debido a que, todos estos factores meteorológicos y de contaminantes son propios del ambiente de la zona, siendo así muy probable que se pueda producir el fenómeno de corrosión. Este último se puede definir como “el deterioro de los metales por las reacciones químicas y electroquímicas cuando entran en contacto con agentes medioambientales como son los gases, sustancias ácidas, sustancias salinas, agentes de la atmosfera y sustancias orgánicas”. (Salazar-Jiménez, 2015, pág. 128).

Cuando en un metal se presenta el fenómeno de la corrosión, se está produciendo una reacción química, dicha reacción química puede generar productos de corrosión “Cuando los productos de corrosión se quedan en la superficie del metal y a la vez se le dificulta el desarrollo de un mayor proceso de corrosión, a este fenómeno se le conoce como pasivación” (Molera-Sola, 1990, pág. 12). Así mismo, un mayor volumen del refuerzo podría generar esfuerzos de tensión en el concreto este fenómeno podría producir daños como agrietamiento o fallas en el sistema estructural.

“El concreto posee propiedades de alto grado alcalino (rango de pH de 12 a 13), lo cual protege al refuerzo contra la corrosión” (Montani, 2000) Pero, aun así, la falta de recubrimiento al refuerzo, la baja calidad del concreto, las fisuras y fallas presentes en las estructuras disminuyen el grado de protección contra la corrosión. Por otra parte, los cloruros y/o sulfatos, entre otros contaminantes en la atmosfera también aceleran el proceso de deterioro. Las edificaciones ubicadas en zonas costeras construidas en concreto armado podrían verse afectadas por este fenómeno, teniendo en cuenta que el agua de mar contiene

iones de cloruro que son arrastrados por la brisa marina propagándose a través de la estructura capilar del concreto de las edificaciones (De\_la\_Cotera, 1998). A medida que el acero hace contacto con las partículas salinas que se encuentran en el aire las estructuras podrían presentar cambios fisicoquímicos, es decir, aparición de agrietamientos, manchas y pérdida de propiedades en las barras de acero lo cual podría disminuir su vida útil.

Debido a los cambios descritos anteriormente, las estructuras de concreto armado especialmente en las zonas costeras podrían estar propensas a sufrir pérdida de la resistencia de los elementos estructurales lo cual podría poner en peligro la vida de las personas que se encuentren en la edificación, además las pérdidas económicas directas que podrían ocasionarse por no tener en cuenta el fenómeno de la corrosión.

### 1.1.Planteamiento del problema

Históricamente el hormigón armado ha sido el principal material de construcción para las estructuras convencionales. Con el transcurso del tiempo es posible que algunas edificaciones comiencen a deteriorarse lo cual podría estar asociado con la corrosión del refuerzo, este último se define como “proceso a través del cual un material metálico se deteriora, como resultado de interactuar con el medio que lo rodea” (Vázquez, 2018, pág. 9).

De acuerdo con lo anterior, unos de los problemas que podría estar presentes en el concreto reforzado es la corrosión, lo cual podría causar pérdida en la resistencia de los elementos estructurales ante las solicitaciones, por lo tanto, se hace necesario el estudio de la corrosión en función de las modificaciones que podría producir en el comportamiento estructural de una edificación. Se pueden encontrar diversas estructuras que son afectadas por este fenómeno, según el diario El Heraldo, Narváez Ortega (2018). Algunos ejemplos son; apartahotel El Golf, Hotel Royal, el edificio Cinema Murillo y hotel rosado. Como se logra ver en la **figura 1**, a simple vista estas estructuras ubicadas en la zona costa de Colombia específicamente en la ciudad de Barranquilla presentan problemas de corrosión



**Figura 1.** Estructuras corroídas en Barranquilla. Fuente: Narváez, V. (2018). <https://www.elheraldo.co>.

Según Vázquez, 2018, “La corrosión de las armaduras del hormigón armado se manifiesta con particular severidad en las ciudades próximas a la costa del mar. En estas localidades, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado es motivo de constante preocupación” (p.16). De igual forma, otro factor que podría empeorar la afectación por corrosión en las estructuras es el no cumplimiento con las normas de diseño, normas de construcción y la baja calidad de los materiales usados. De acuerdo con lo explicado anteriormente se desprende la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuáles son los efectos del fenómeno de la corrosión para una estructura aperturada convencional mediante correlaciones de resistencia y porcentajes de pérdida de masa del acero?*

## **1.2. Justificación**

Las edificaciones de concreto reforzado son construidas con el fin de satisfacer necesidades ya sea de viviendas, para oficinas, hospitales, institucionales, gubernamentales, etc. Por lo cual se debería garantizar principalmente 3 aspectos al momento de diseñar y construir las estructuras; Seguridad, economía y funcionalidad. Uno de los principales problemas que podría atentar contra estos 3 aspectos es la corrosión producida en el refuerzo.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario estudiar el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado cuando estas son afectadas por la corrosión, además en Colombia este es un problema que podría estar presente en muchas estructuras especialmente en las zonas de la costa, debido a que, por la cercanía de las edificaciones al mar, estas podrían verse mayormente afectadas por la concentración de cloruros en el ambiente.

El propósito fundamental del estudio es presentar información valiosa que permita a los ingenieros diseñadores y encargados de construir edificaciones adquirir criterios sobre la importancia de considerar el fenómeno de la corrosión principalmente enfocado en dos aspectos que son; la determinación del nivel de corrosión que podría afectar a la estructura y

el impacto que ese grado de corrosión genera en las propiedades de esta. Otro aspecto que fundamenta la investigación es presentar información valiosa recopilada de la literatura científica que permita a investigadores obtener una fuente importante sobre el análisis del comportamiento de las edificaciones por los problemas de corrosión del refuerzo.

### **1.3.Objetivos**

#### **General**

Analizar el efecto de la corrosión de una estructura aporticada convencional colombiana de concreto reforzado a partir de modelos estadísticos.

#### **Específico**

- Realizar una revisión de la literatura científica para identificar diferentes métodos de análisis y evaluación de la corrosión de acero embebido en concreto.
- Realizar el diseño estructural de una edificación aporticada convencional que cumpla con todos los requisitos dispuestos por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR - 10.
- Realizar correlaciones empíricas para calcular el efecto de la corrosión en términos de pérdida de la resistencia a la compresión y el porcentaje de pérdida de masa del acero sustentadas en modelos matemáticos y resultados de laboratorios disponibles en la literatura.

## 1.4. Marco referencial

### 1.4.1. Marco teórico

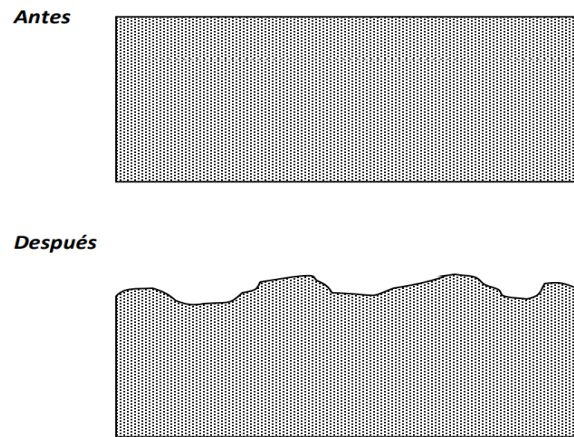
**1.4.1.1. Corrosión de metales.** Los metales más utilizados son inestables en la atmósfera, y estos se producen reduciendo artificialmente los minerales y, por lo tanto, tienden a volver a su estado original o compuestos metálicos similares cuando se expone a la atmósfera. “Las excepciones a esto son el oro y el platino, que son ya en su estado metálico. Estos cambios son reacciones electroquímicas que siguen las leyes de la termodinámica” (Schweitzer, 2010, pág. 5).

La corrosión por su definición más simple es el proceso de retorno de un metal. al estado termodinámico del material. “Para la mayoría de los materiales, esto significa formación de los óxidos o sulfuros de los que originalmente comenzaron cuando fueron extraídos de la tierra antes de ser refinados en materiales de ingeniería útiles” (Schweitzer, 2010, pág. 5).

#### 1.4.1.2. Tipos de corrosión.

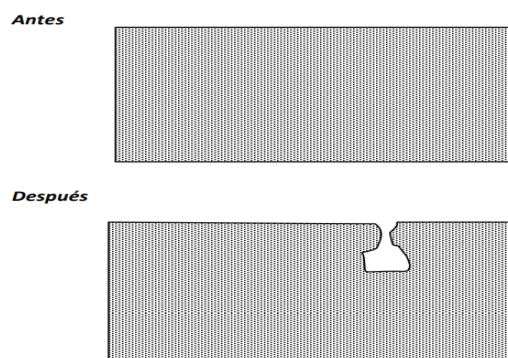
- **Corrosión uniforme o Generalizada.** Se trata de los casos en que la corrosión se produce de manera pareja y uniforme, atacando prácticamente toda la superficie por igual. El metal se oxida de forma bastante homogénea y regular a lo largo de la mayor parte de la superficie, en la interfase entre el metal y el medio que lo rodea. “El material pierde una delgada capa superficial, cuyo espesor estará determinado por la velocidad con que se produce el ataque y también por el tiempo durante el que haya sido expuesto al medio agresivo” (Vázquez, 2018, pág. 49). La Figura 2, muestra cómo se observa el fenómeno de corrosión uniforme que sufre un metal.





**Figura 2.** Antes y después de corrosión uniforme. Fuente: Tomado de Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 50.

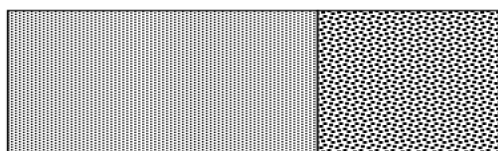
- **Corrosión localizada.** La corrosión localizada, al contrario de la corrosión uniforme, representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad ya que se manifiesta en zonas específicas en el material, determinadas tanto por la naturaleza del material, la geometría de este, y las condiciones del medio al que se somete. Los procesos de corrosión localizada de mayor ocurrencia son galvánicos, por fisura, por picaduras, por cavitación y microbiológica (Salazar-Jiménez, 2015, pág. 51). La Figura 3, muestra cómo se observa el fenómeno de corrosión localizada que sufre un metal.



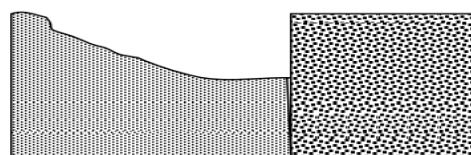
**Figura 3.** Antes y después de corrosión localizada. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 52.

- **Corrosión galvánica.** Se trata de un tipo de ataque que se caracteriza por estar localizado en un área bien delimitada y generalmente pequeña. En el caso de una cañería, por poner un ejemplo, lo que comienza con una mancha apenas perceptible, del tamaño de la cabeza de un alfiler, puede desembocar bastante rápido en una perforación de la pared del caño. Las regiones vecinas al punto de ataque suelen permanecer intactas, aunque en algunas ocasiones las picaduras aparecen muy próximas unas de otras y dan la apariencia de una superficie rugosa (Vázquez, 2018, pág. 56). La Figura 4, muestra cómo se observa el fenómeno de corrosión galvánica que sufre un metal.

**Antes**

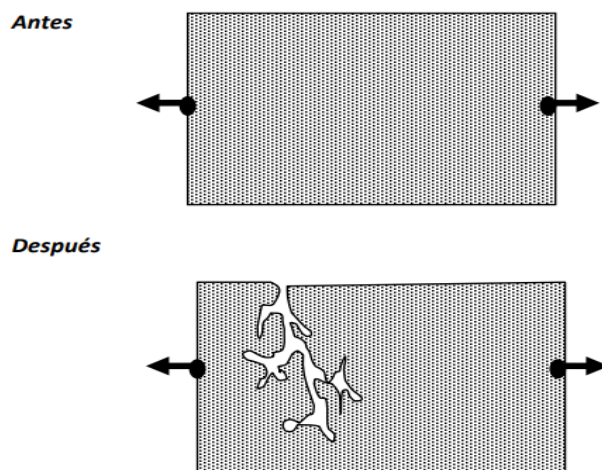


**Después**



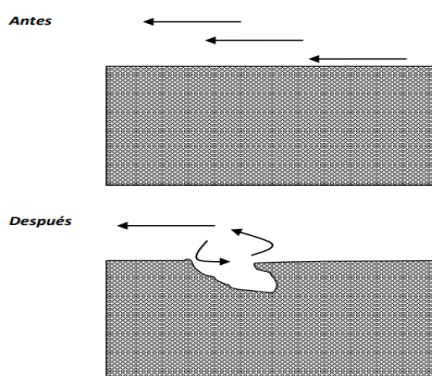
**Figura 4.** Antes y después de corrosión galvánica. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 57.

- **Corrosión bajo tensión.** La corrosión bajo tensiones ocurre en algunos materiales metálicos bajo la influencia combinada de un entorno corrosivo y un esfuerzo de tensión (cargas externamente aplicadas o tensiones internas). Se trata de un mecanismo progresivo que termina provocando una fractura en el material metálico y que resulta en la característica aparición de fisuras muy ramificadas (Vázquez, 2018, pág. 61). La Figura 5, muestra cómo se observa el fenómeno de corrosión bajo tensión que sufre un metal.



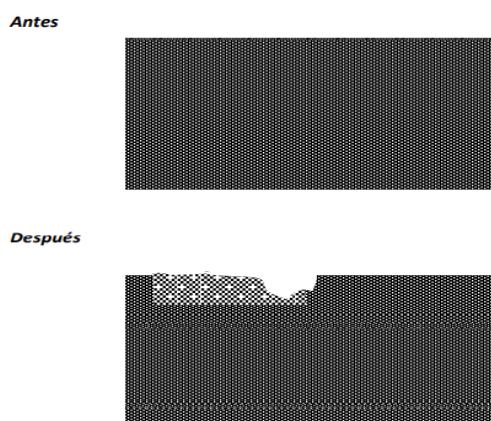
**Figura 5.** Antes y después Corrosión Bajo tensión. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 62.

- **Corrosión erosión.** Ocurre cuando la corrosión está acompañada por un proceso de desgaste mecánico (o abrasivo), normalmente debido a que existe un movimiento relativo entre el material metálico y el medio corrosivo. Tal sería el caso de una cañería dentro de las que circula un fluido agresivo a alta velocidad. En estos casos, la capa pasiva está continuamente sometida a efectos corrosivos y de desgaste en forma simultánea, de modo que la continua eliminación de esta capa protectora acelera la corrosión (Vázquez, 2018, pág. 63). La Figura 6, muestra cómo se observa el fenómeno de corrosión erosión que sufre un metal.



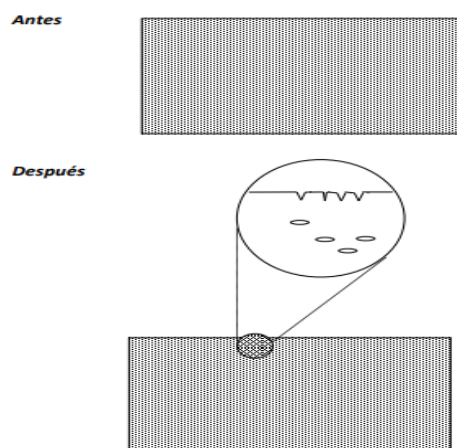
**Figura 6.** Antes y después Corrosión Erosión. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. [Imagen]. Pag. 64.

▪ **Dealeado.** El dealeado, o disolución selectiva, comprende la remoción preferencial de un elemento de aleación por procesos de la corrosión. Un ejemplo común es el que se conoce como dezincificación del latón. El latón es una aleación donde el cobre es el elemento mayoritario y el zinc uno de los principales aleantes. Cuando el latón entra en contacto con un medio corrosivo, sufre dealeado: el zinc se disuelve mayoritariamente, lo que deja a la aleación convertida en una estructura de cobre, debilitada y porosa. La pérdida selectiva del zinc puede proceder de manera uniforme o localizada (Vázquez, 2018, pág. 65). La Figura 7, muestra cómo se observa el fenómeno de dealeado que sufre un metal.



**Figura 7.** Antes y Después Fenómeno de Dealeado. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. [Imagen]. Pag. 66.

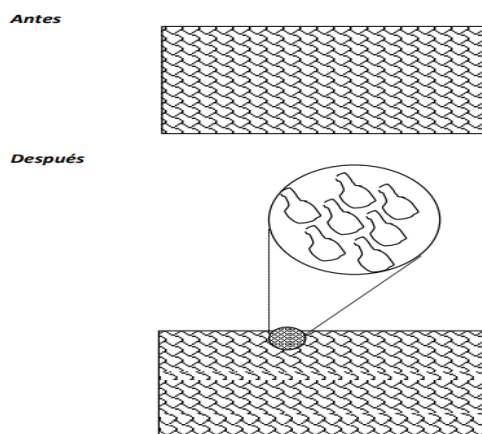
▪ **Fragilización por Hidrogeno.** La fragilización por hidrógeno de un metal o aleación implica la incorporación de átomos de hidrógeno en el material, lo que reduce drásticamente su ductilidad y su resistencia mecánica, causando fallas y grietas catastróficas aun cuando los esfuerzos mecánicos estén por debajo del límite de los que puede soportar ese material (Vázquez, 2018, pág. 67). La Figura 8, muestra cómo se observa el fenómeno de Fragilización por hidrogeno que sufre un metal.



**Figura 8.** Antes y después Fragilización por hidrógeno. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 68.

- **Corrosión intergranular.** La mayoría de los materiales metálicos de aplicación industrial son aleaciones compuestas por diferentes tipos de átomos. Estos átomos deben acomodarse de manera muy específica en la estructura sólida del material. A nivel microscópico, existen pequeñas regiones donde se da determinado ordenamiento regular, con una cierta orientación en el espacio. Cada una de estas regiones se denomina grano, de modo que, a una escala muy pequeña, la aleación está constituida por un conglomerado de granos.

La corrosión intergranular es, entonces, un tipo de ataque selectivo localizado en los bordes de grano, dado que estos son ligeramente más reactivos que la matriz. La causa del ataque intergranular puede relacionarse con el hecho de que en los límites de grano existe una mayor concentración de impurezas y una menor concentración de los elementos que confieren pasividad. Si el ataque progresa, pueden llegar a desprenderse granos completos (Vázquez, 2018, pág. 59). La Figura 9, muestra cómo se observa la corrosión intergranular que sufre un metal.



**Figura 9.** Antes y después Corrosión intergranular. Fuente: Vázquez, (2018). La corrosión el peor de los villanos cuando dominan los metales /1a ed. Pag. 60.

**1.4.1.3. Corrosión en refuerzos de estructuras de concreto.** La corrosión en el refuerzo de concreto podría ser más severa en las zonas cercanas a la costa del mar. En estas zonas, la funcionalidad y resistencia de las armaduras del concreto es motivo constante de preocupación. Pero también, en la mayoría de los casos, los problemas de corrosión podrían ser originados por errores en la ejecución de la obra y en su diseño, el empleo de materiales de baja calidad y la falta de mantenimiento (Vázquez, 2018).

**1.4.1.4. Definición de Grado de corrosión.** La corrosión implica la disolución del metal, como resultado de lo cual la parte metálica pierde su masa (o peso) y se vuelve más delgada (Schweitzer, 2010). En la presente investigación, la tasa de corrosión se establece como el porcentaje de pérdida de masa del acero embebido en concreto y hay varias formas de medir este porcentaje como se muestra a continuación.

**1.4.1.5. Formas de medir la tasa de corrosión.** Para el cálculo de la pérdida de masa por corrosión acelerada, se puede tener cuenta el principio de la ley de Faraday (Ver ecuación 1).

$$m_t = \frac{t * I * M}{z * F} \quad \text{(Ecuación. 1)}$$

Donde;  $m_t$  es la pérdida de masa,  $t$  es el tiempo (s),  $I$  es la corriente (A),  $M$  es la masa molar del elemento ( $g/mol$  for iron = 55.847),  $z$  es la valencia del elemento (for iron =

2), y F es la constante de Faraday ( $coulomb/mol = 96.487$ ).

Para el cálculo de la pérdida de masa real (**ver ecuación 2**), simplemente nos basamos en el principio del cálculo de Error relativo porcentual, considerando la masa antes y después de corroída.

$$C_w = (Perdida\ de\ masa) = \frac{M_{base}(antes\ de\ corrosion) - M_c(después\ de\ corrosion)}{M_{base}(antes\ de\ corrosion)} \times 100$$

**(Ecuación. 2)**

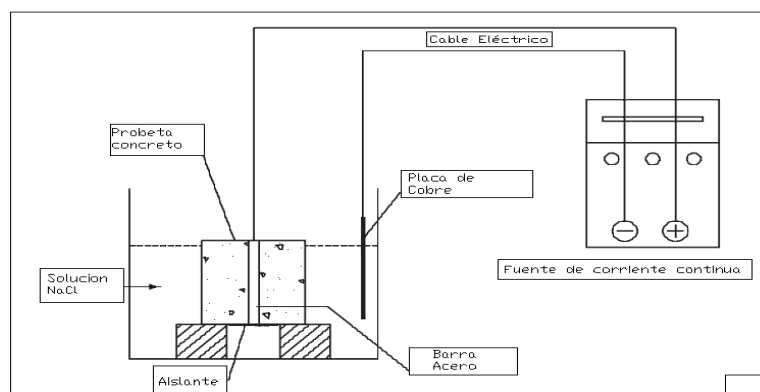
**1.4.1.6. Métodos electroquímicos y ambientales para medición y análisis de la corrosión.** Anteriormente, la inspección visual y los métodos gravimétricos, los cuales consistían en la medición de la pérdida de peso, eran los mecanismos utilizados para medir la corrosión mediante la utilización de ensayos destructivos se determinaba si el proceso de corrosión se estaba produciendo.

Debido a que, la mayoría de los fenómenos de corrosión que afectan a los metales son de carácter electroquímicos, es decir, su desarrollo implica una transferencia de carga. Lo anterior permitió el desarrollo de los llamados métodos electroquímicos para medir la corrosión, lo cual permitió la detección rápida de la rotura de la pasividad del refuerzo en el hormigón midiendo las variables eléctricas, es posible determinar las velocidades de corrosión y otros parámetros interesantes. (Soto Camino , Gandía Romero, & Monzón Bello, 2014).

Una particularidad de los métodos electroquímicos es que, permiten hacer ensayos no destructivos, lo cual podría ser una ventaja ya que, no se hace necesario la rotura de elementos de hormigón reforzado para medir el grado de corrosión.

El proceso de corrosión en el refuerzo del concreto desarrollado de forma natural podría tardar cierto tiempo dependiendo de las características ambientales y de materiales usados, por lo que, al momento de realizar investigaciones de tipo experimental se opte por usar métodos de corrosión acelerada que permitan corroer en un menor tiempo el elemento en estudio en comparación con el tiempo que tardaría de forma natural.

Las técnicas electroquímicas para corrosión acelerada básicamente consisten en armar un sistema compuesto por; probetas de concreto reforzado, fuente de corriente eléctrica, cables de conducción eléctrica, concentración química (NaCl). El sistema funciona aplicando corriente eléctrica al refuerzo del concreto, a la vez la probeta debe estar sumergida en una solución química (NaCl) a cierto porcentaje y en contacto directo para acelerar el proceso. A continuación, en la Figura 10 se ilustra el sistema base que han usado los autores citados en esta investigación para acelerar el proceso de corrosión en su fase experimental.



**Figura 10.** Sistema de corrosión acelerada Fuente: Mohsen A, et. al (2016). Efecto de la corrosión longitudinal de las barras de refuerzo sobre la reducción de la resistencia a la compresión. Pàg 900.

A continuación, en la **tabla 1** se presenta el resumen de diferentes métodos que se podrían utilizar para analizar la corrosión del acero embebido en el concreto.



**Tabla 1.**

*Métodos para analizar la corrosión en el acero embebido en el concreto.*

<b>MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO</b>	
<b>Métodos</b>	<b>características</b>
Medición de potencial de media celda (Ecorr)	Primero, se debe determinar del recubrimiento actual del refuerzo, luego medir el potencial de la armadura del hormigón. Posterior a esto, se evalúa el daño por corrosión utilizando criterios como el potencial de corrosión teniendo en cuenta el PH del concreto, concentración de cloruros y carbonos en el ambiente y lo elementos expuesto a oxígeno a gran medida.
Técnicas para estimar corrosión en el acero embebido en concreto mediante la determinación de la resistividad eléctrica	Primeramente, la probeta de concreto armado se someten a una corriente dada de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen y se registra el voltaje para luego calcular la resistividad eléctrica y posteriormente se determina el riesgo de corrosión de forma cualitativa de acuerdo con los criterios siguientes. Para resistividad (w.cm)>20000 es corrosión despreciable, resistividad (w.cm)10000 a 20000 es baja, resistividad (w.cm)5000 a 10000 es alta y resistividad (w.cm) <5000 es muy alto.
Método de velocidad de corrosión	Se debe iniciar midiendo la resistencia a la polarización utilizando equipos como potencióstatos/galvanostatos, luego se calcula la velocidad de corrosión (Icorr) según el método de Stern Geary y posteriormente, se determina la perdida de sección mediante la ley de Faraday.
Determinación de la concentración de cloruros CL en estructuras	Inicialmente se realiza la extracción de testigos de la estructura para determinar la cantidad de cloruro en el concreto y posterior a esto calcular la profundidad de penetración de este, luego se calcula la predicción de la velocidad de penetración según la segunda ley de Fick.
Método de Influencia del elemento (medio de corrosión)	Primero según el modelo de Powers et. al (1959) se calcula la Porosidad (Np%) del concreto, luego calcular coeficiente de retardo. Las variables climáticas pueden considerarse como pieza clave para la determinación de la corrosión del acero embebido en el concreto. Finalmente, se determina la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) y la intensidad de corrosión involucrando los factores ambientales.
Diagnóstico general desde el punto de vista de corrosión	Estará basado en los dos grupos de información como lo es la información sobre el medio ambiental y sobre las condiciones actuales de la estructura, mediante esto se examina la estructura para

---

determinar la presencia de cloruros y posteriormente analizar el efecto del cloruro en la corrosión del acero.

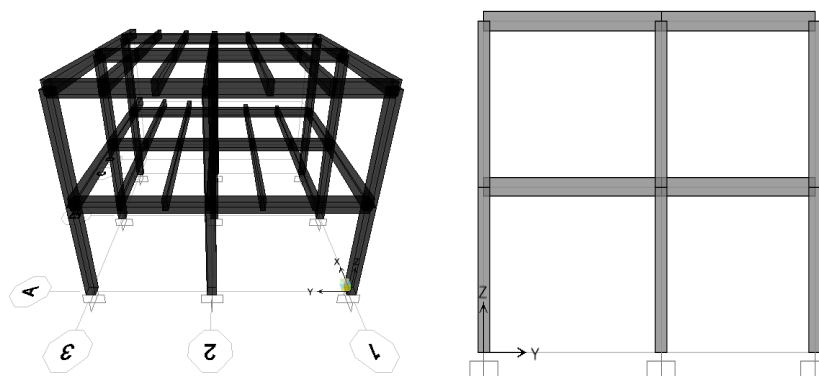
---

*Nota. Fuente:* Ismail & Ernest Ituma, (2017). ASTM C876-87, (1987). DURAR , (1997). Browne, (1992). Renata, (2010). Freeze & Cherry, (1979). Castillo Talavera, (2005

**1.4.1.7. Análisis estructural.** El análisis estructural podría definirse como un procedimiento utilizado para determinar esfuerzos internos y deformaciones de una estructura sometida a sollicitaciones. Para poder diseñar una estructura primero se debe realizar un análisis estructural de esta. A continuación, se describe el procedimiento para el análisis estructural.

- **Definición del sistema estructural.** La combinación de los elementos estructurales y los materiales de que están hechos se conocen como sistema estructural, los cuales podrían clasificarse en; Armaduras, Cables y Arcos, Marcos, Estructuras Superficiales (Hibbeler R. , 2012).

Los marcos están compuestos por vigas y columnas conectadas rígidamente o mediante articulaciones, los marcos se extienden en dos o tres dimensiones. La carga en un marco ocasiona flexión de sus elementos; y si tiene conexiones de unión rígiditas, por lo general esta estructura es indeterminada desde el punto de vista analítico (Hibbeler R. , 2012). A continuación, en la figura 11 se presentan ejemplos marcos estructurales en 3D y 2D



**Figura 11.** Sistema de marco, vista en 3D y 2D. **Fuente:** Elaboración propia.

- **Definición de cargas.** Una vez se ha definido los requisitos dimensionales para una estructura, es necesario determinar las cargas que deben soportar la estructura. La anticipación de las diferentes cargas que se impondrán a una estructura suele proporcionar el tipo básico de estructura que se elegirá (Hibbeler R. , 2012).

La NSR-10 dedica su título A y B a regular la forma como deben evaluarse las cargas a las cuales deben someterse una estructura. Las cargas pueden clasificarse en Cargas estáticas (muertas y vivas) y cargas dinámicas (sísmicas, cargas de viento, explosiones o impactos).

- **Idealización estructural** El análisis exacto de una estructura es imposible de realizar, debido a que siempre se deben estimar las cargas y la resistencia de los materiales que componen la estructura. Además, también deben estimarse los puntos de aplicación de las cargas. Debido a esto se debe desarrollar la capacidad de modelar o idealizar la estructura a fin de poder efectuar un análisis de fuerzas de los elementos (Hibbeler R. , 2012).

- **Determinación de acciones internas.** Una vez tengamos un sistema estructural definido, las cargas aplicadas a esa estructura y la idealización correcta; se procede al cálculo de las fuerzas interna y respuesta de la estructura. Existen diferentes

métodos definidos para la realización del cálculo ya sea por principios de la estática para estructuras estáticamente determinadas y para estructuras estáticamente indeterminadas se usan métodos como el análisis matricial.

#### 1.4.1.8 Análisis sísmico Método de Fuerza Horizontal Equivalente FHE. El

método de la FHE es un análisis en el cual se calcula una fuerza lateral que actúa sobre la edificación que sería equivalente a la fuerza producida por un sismo en la base de la estructura. El método consiste en calcular el cortante basal, posteriormente este cortante se reparte en cada uno de los pisos de la edificación como cargas puntuales en los nodos de un pórtico.

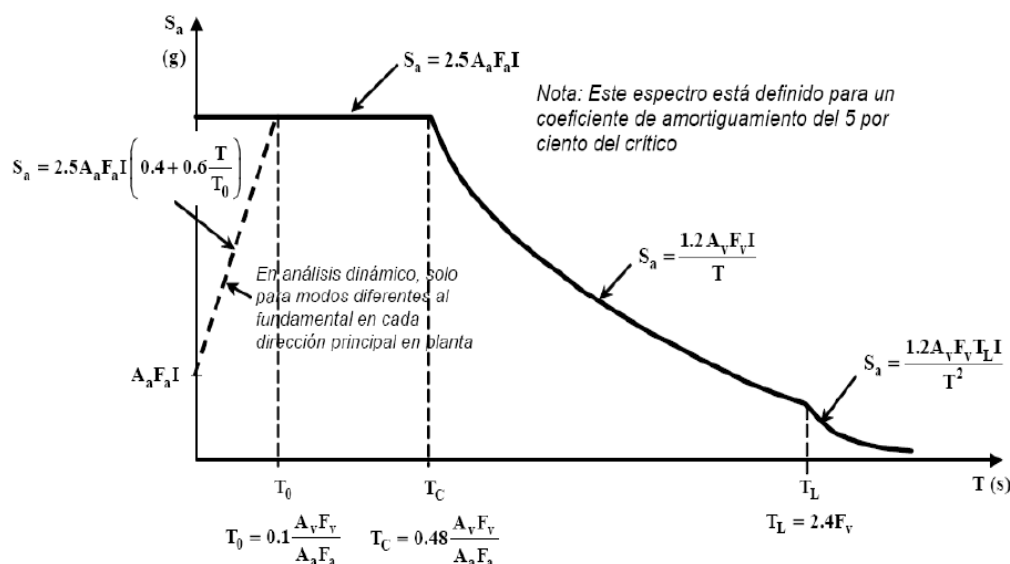
- **Cortante basal  $V_s$ .** Equivale a la totalidad de los efectos inerciales

horizontales producidos por los movimientos sísmicos (Ver ecuación 3).

$$V_s = s_a g M \quad \text{(Ecuación 3) Tomado de la NSR-10}$$

Donde:  $V_s$  es el Cortante basal,  $S_a$  es la Máxima aceleración de diseño (Fracción de gravedad),  $g$  Aceleración de la gravedad,  $M$  Masa de los elementos estructurales y No estructurales.

- **Máxima aceleración de diseño  $S_a$ .** Para el análisis por FHE se debe calcular  $S_a$  con alguno de los siguientes modelos matemáticos del espectro de aceleración (Ver figura 12). El modelo correcto dependerá del rango donde se encuentre el periodo natural de la estructura.



**Figura 12.** Espectro de aceleración, Fuente: Tomado de NSR, (2010) Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Título A, pag 27.

- **Variables para el cálculo del espectro de aceleración.** A continuación, se presentan las variables que se deben utilizar para la determinación del cortante basal que representa la fuerza sísmica por medio del método de FHR.

**Aa:** Coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva. Es un parámetro utilizado para determinar el espectro de diseño.

**Av:** Coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva. Es un parámetro utilizado para determinar el espectro de diseño.

**Fa:** Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos.

**Fv:** Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos largos.

**I:** Importancia. Depende del uso de la estructura.

**T:** Periodo de vibración de la estructura.

- **Periodo natural de la edificación.** El periodo natural depende de las características de la estructura (Tipo de estructura, material, dimensiones) como lo muestra la ecuación 4.

$$T_a = c_t h^\alpha \quad \text{(Ecuación. 4) Tomado de la NSR-10}$$

Donde:  $T_a$  Es el periodo natural de la edificación,

$C_t$  y  $\alpha$ . Tienen valores dados en Tabla A.4.2-3 de la NSR-10.

### **1.4.2. Marco legal.**

En Colombia el diseño de estructuras de concreto armado se rige bajo los parámetros estipulados en la Norma Sismo Resistente vigente NSR-10. A continuación, se presentan los incisos y títulos tenidos en cuenta en el estudio.

- NSR-10 Título a. Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente.
- NSR-10 título b. Cargas.
- NSR-10 título c. Concreto Estructural.

### **1.5.Estado del Arte.**

**Investigaciones sobre la influencia de la corrosión en la capacidad resistencia de cargas en elementos de concreto reforzado.**

En algunas investigaciones se ha determinado la influencia del nivel de daño por corrosión en el desempeño de elementos de concreto armado.

Referente a esto, Di Sarno & Pugliese, (2020) evaluaron estructura de concreto armado expuestas a diferentes niveles de corrosión. Con un análisis estático no lineal basado en cuatro exposiciones diferentes y tres cargas laterales, patrones demostraron que la corrosión reduce significativamente la capacidad de corte y la ductilidad global de un edificio existente.

Radhi et. al (2020) en los ensayos de laboratorio realizados concluyeron que “la capacidad de carga de las columnas de hormigón armado corroídas se reduce a medida que el nivel de la corrosión aumenta, la reducción de las cargas últimas fue de aproximadamente 19%, 29% y 45% a nivel de daño por corrosión del 10%, 20% y 30%, respectivamente” (Pág. 1626).

Fernandez I. et. al (2018) Evaluaron la variación de las propiedades mecánicas del acero corroído y la reducción en la interacción de unión entre el hormigón y el acero. Se concluye que la reducción de la capacidad de carga hasta en un 55% es debido a la rotura de una muestra fallando prematuramente estando dentro de un nivel de corrosión entre 15 y 24%.

Mohsen Ali et. al (2016). En su investigación los “Efecto de la corrosión longitudinal de la barra de refuerzo en la reducción de la resistencia a la compresión del hormigón en la estructura de hormigón armado”, varias probetas cúbicas con diferentes proporciones a/c que contienen barras de refuerzo se probaron para determinar la resistencia final a la compresión con diferentes grados corrosión de refuerzos. Considerando los experimentos realizados, la cantidad de reducción de la resistencia a la compresión es directamente proporcional al incremento del grado de corrosión.

### **Investigaciones sobre la influencia de cloruros y sulfatos en la corrosión del acero embebido en el concreto.**

Referente a esto, Jimenez Vazquez & Lozado Ovalle, (2018). En su investigación “análisis de la influencia de sulfatos y cloruros en el deterioro de estructuras en concreto en zonas costeras del atlántico colombiano” se realiza una revisión de la literatura y ensayos de laboratorios para comparar el comportamiento de hormigón armado sometido al ataque de sulfatos y cloruros en diferentes ciudades de la costa de Colombia, en dicho estudio se ha concluido que las muestras expuestas a concentraciones de sulfatos y cloruro + sulfatos han tenido una disminución en la resistencia a la compresión a los 28 días.

Raydel Lorenzo, et al (2018). Mediante el establecimiento de una norma de ensayo determinaron la vida útil de las estructuras de hormigón armado por acción de los iones de cloruro, además de analizar la variación del coeficiente de difusión al utilizar diferentes

relaciones agua/cemento. Al final, Se pudo comprobar que la relación agua/cemento influye en la concentración de cloruro en las diferentes capas de la estructura de hormigón, es decir, la mayor la relación agua/cemento, mayor es la concentración de cloruro en una capa determinada.

Angst & Elsener, (2017) realizan una previsión de la vida útil de las infraestructuras de hormigón en entornos corrosivos. Con esto determinan que la concentración de cloruro en la superficie del acero necesaria para iniciar la corrosión disminuye al aumentar la longitud de las vigas de hormigón armado expuestos a cloruros.

## 2. Parte Experimental.

Esta etapa consistió en realizar una búsqueda exhaustiva sobre los diferentes métodos que se pueden emplear para analizar o evaluar la corrosión del acero embebido en concreto: Se realizó una búsqueda de artículos, tesis, libros, proyectos etc., en las bases de datos indexadas Socups, Web Of science, Sience Direct, literatura gris, etc., de la Universidad de la Costa y en las bases de datos y repositorios de otras instituciones de educación superior, con el fin de obtener datos de investigaciones experimentales sobre las variables (Resistencia a la compresión y tasa de corrosión), que nos permitan correlacionar y poder medir en este caso que tanto disminuye la resistencia a la compresión el concreto por la corrosión del acero embebido. En esta etapa se utilizaron las siguientes palabras claves Corrosión, probetas, concreto, compresión, cloruro. También se utilizaron exclusiones como; Medicina y biología

A partir de la información obtenida, se organizaron los datos de las variables Resistencia a la compresión y tasa de corrosión, posteriormente graficando los valores de estas variables se realizó la correlación utilizando el método de mínimos cuadrados.

- **Estudio de Caso.** En esta etapa se estableció la ubicación de la zona de estudio (ver Figura 22). Por otro lado, se adquirieron y analizaron las variables meteorológicas y



ambientales de la zona, esta información fue obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, (2005). Así mismo Bastidas S. et al (2016) en su estudio Eventos de intensificación y relajación del viento en la bahía de Santa Marta (Caribe Colombiano) Implicaciones Oceanográficas.

Posteriormente, se realiza el análisis y diseño estructural de la edificación definida. Para conocer el comportamiento de una estructura, inicialmente se realizó un Predimensionamiento de los elementos estructurales que la conforman, posteriormente se realizó un análisis de cargas para conocer las solicitaciones que llegan a cada elemento, luego se calculó las fuerzas internas y deformaciones que permitieron realizar el diseño estructural lo cual estará fundamentado con una modelación en SAP 2000 verificando que los elementos cumplan los criterios de la NSR, (2010).

Para el análisis estructural se tuvo en cuenta las cargas estáticas, las cuales corresponde al análisis estático y cargas de sismo; para el cálculo de la fuerza sísmica se implementó el método de la fuerza horizontal equivalente FHE siguiendo los parámetros y recomendaciones de la NSR, (2010).

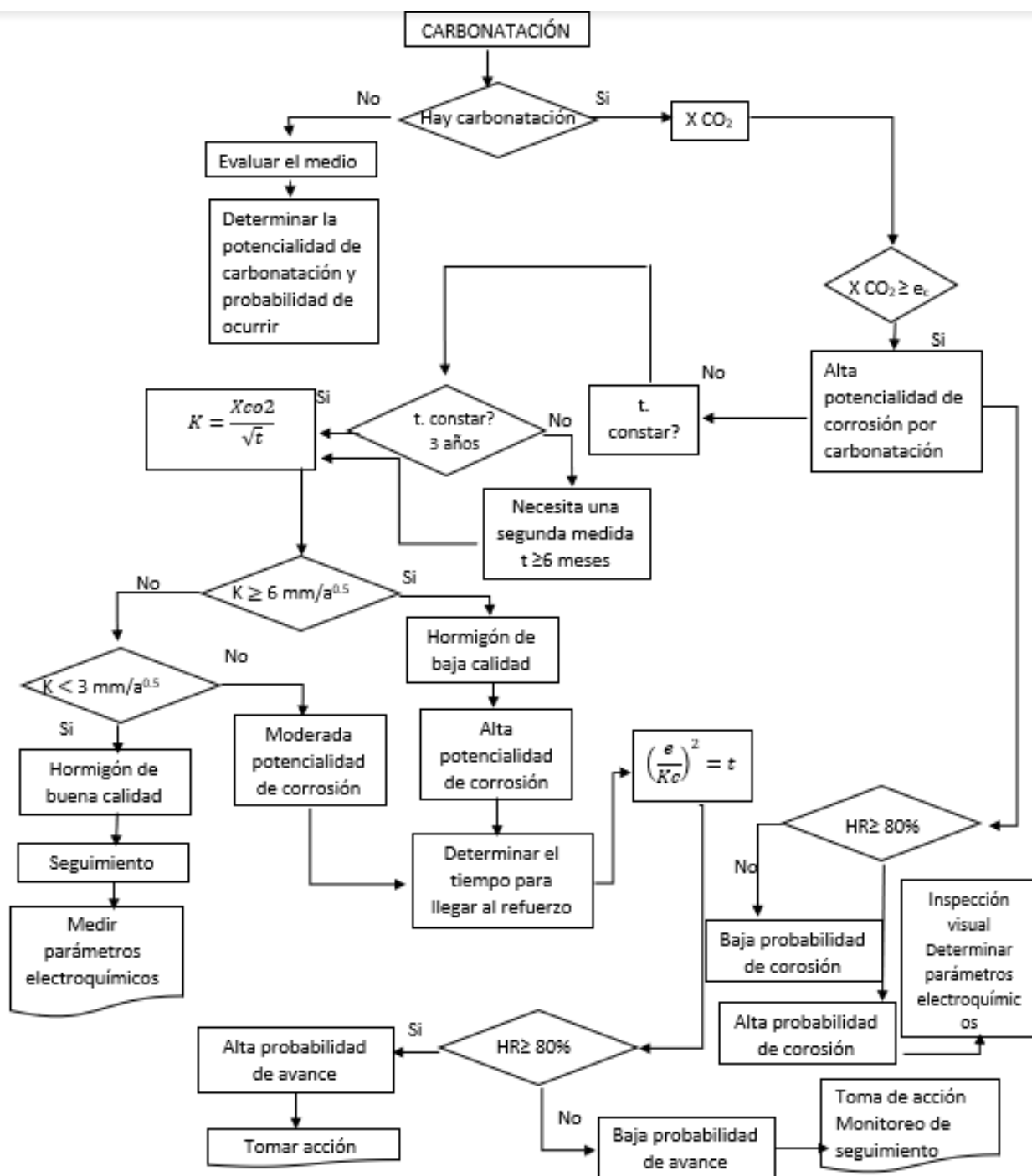
- ***Determinación del grado de corrosión.*** En esta etapa se determinó el grado de corrosión empleando las correlaciones elaboradas mediante datos encontrados en la literatura científica, para evaluar la pérdida de resistencia a la compresión del concreto por el nivel de corrosión que presenta la estructura considerando algunas variables de los materiales y de la zona.

### 3. Resultados y Análisis

#### 3.1. Estimación de la corrosión en estructuras de concreto armado, diagnóstico general.

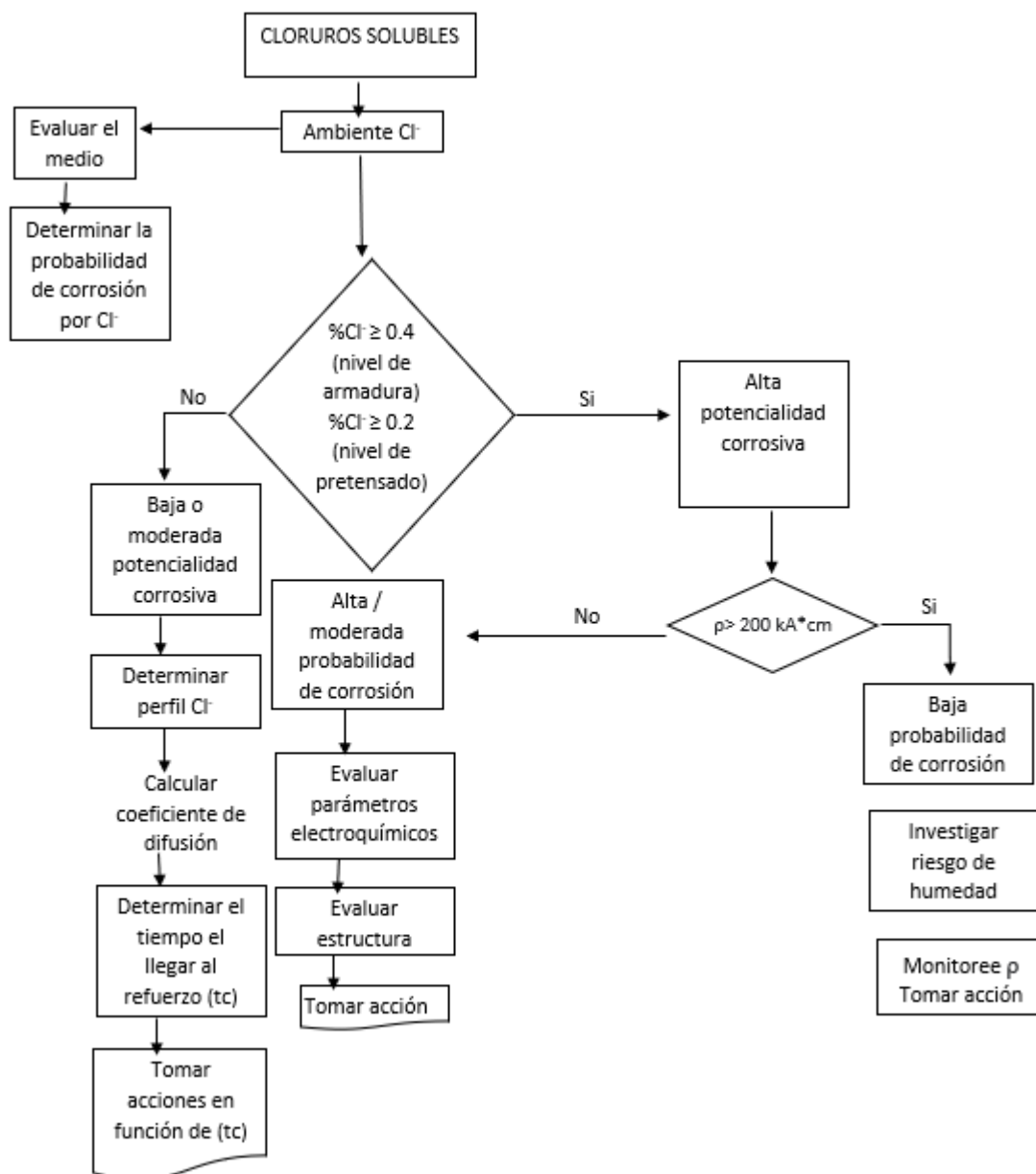
El diagnóstico puede estar basado en los dos grupos de información como lo es la información sobre el medio ambiental y las características de la estructura. De acuerdo con lo anterior y siguiendo una serie de pasos, se puede determinar la probabilidad de corrosión de la edificación. (DURAR, 1997).

**Carbonatación; Evaluación y Diagnóstico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable principal la carbonatación. (Ver Imagen 13).



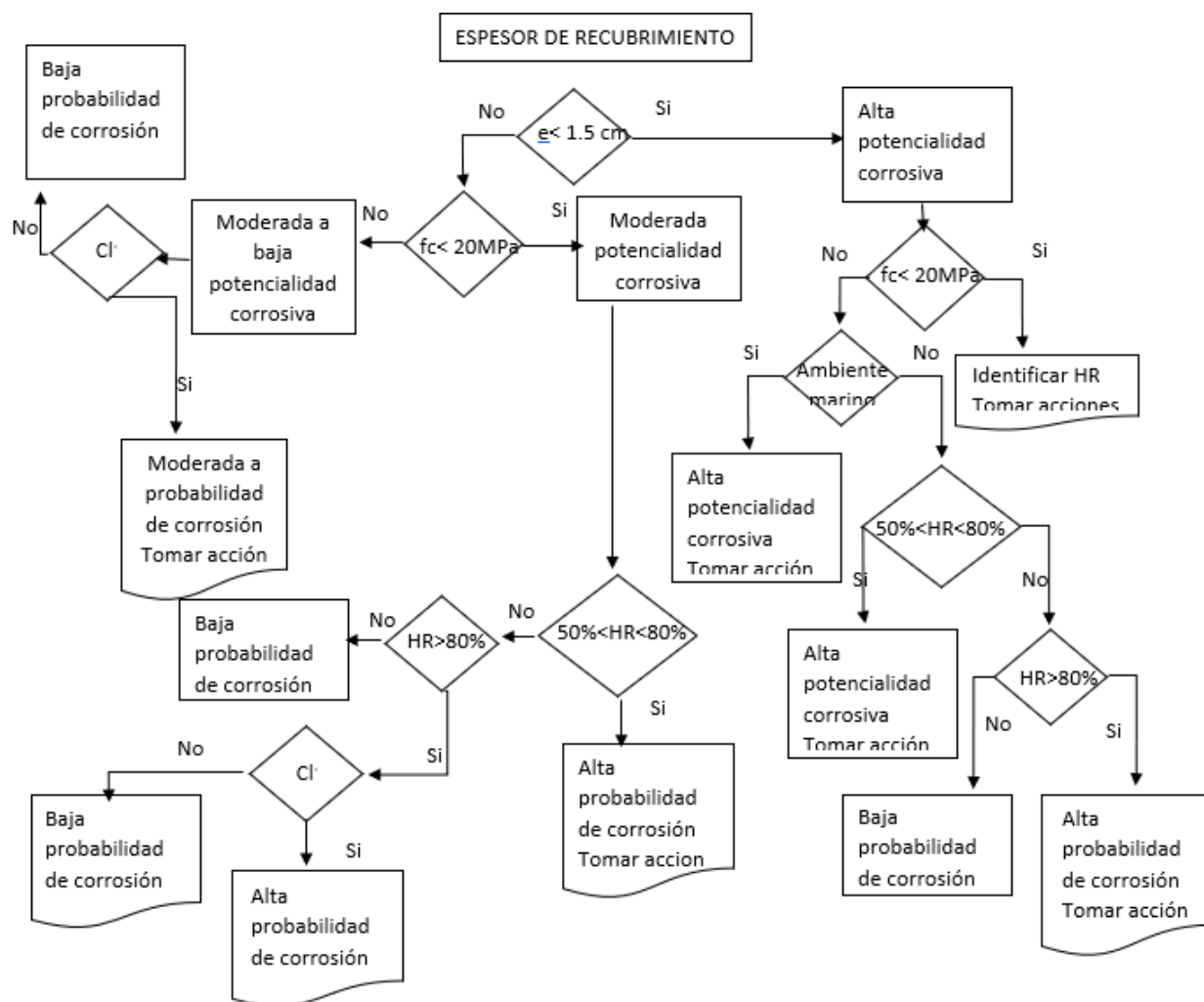
**Figura 13.** Evaluación de la corrosión por carbonatación. *Fuente:* Tomado de DURAR, (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Pàg. 147.

**Cloruros solubles (por peso de cemento): Evaluación y Diagnóstico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable Cloruro solubles. (Ver Imagen 14).



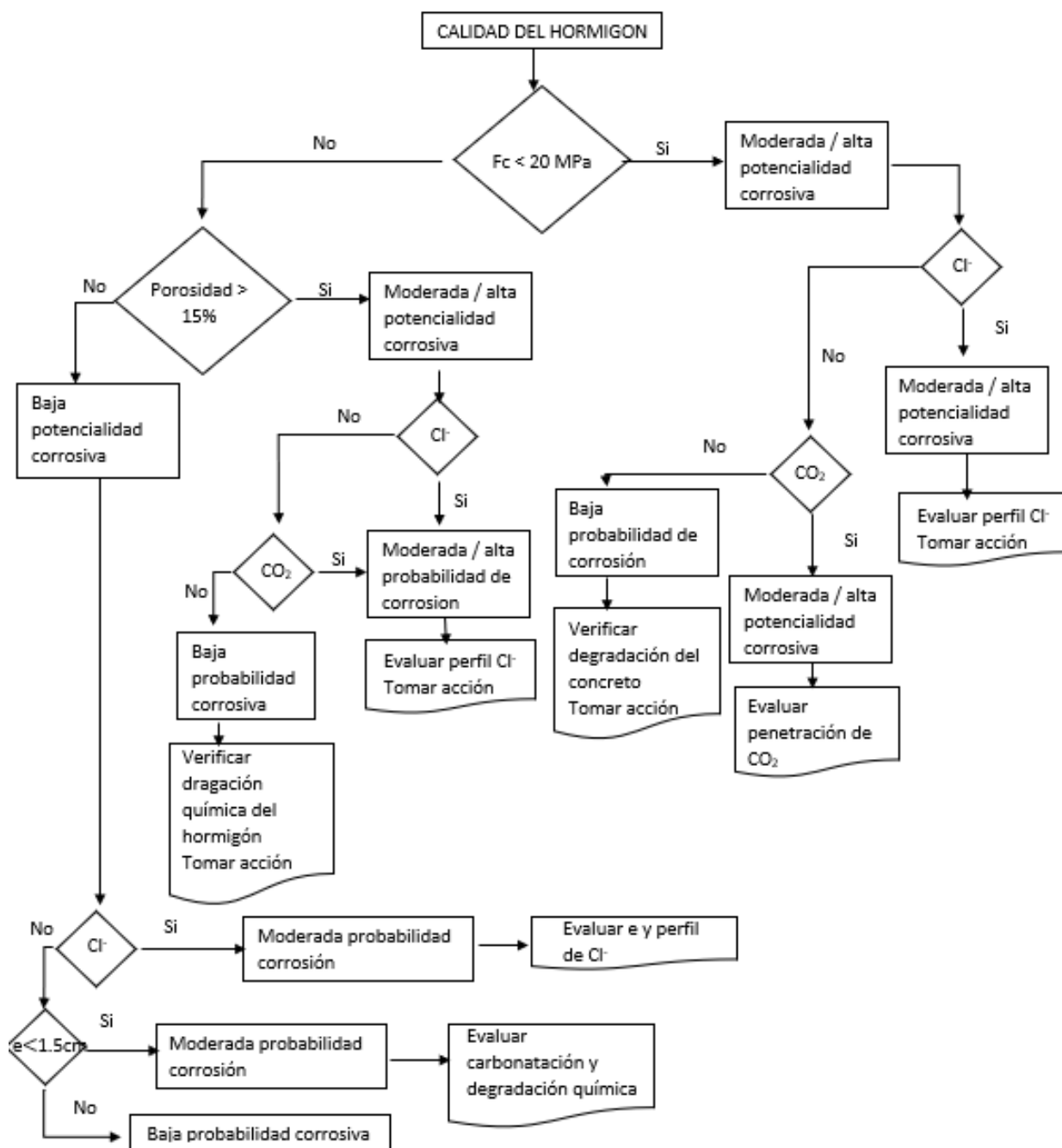
**Figura 14.** Evaluación de la corrosión por cloruros solubles. **Fuente:** Tomado de (DURAR , 1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pàg. 146.

**Espesor de Recubrimiento; Evaluación y Diagnostico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable principal el espesor de recubrimiento. (Ver Imagen 15).



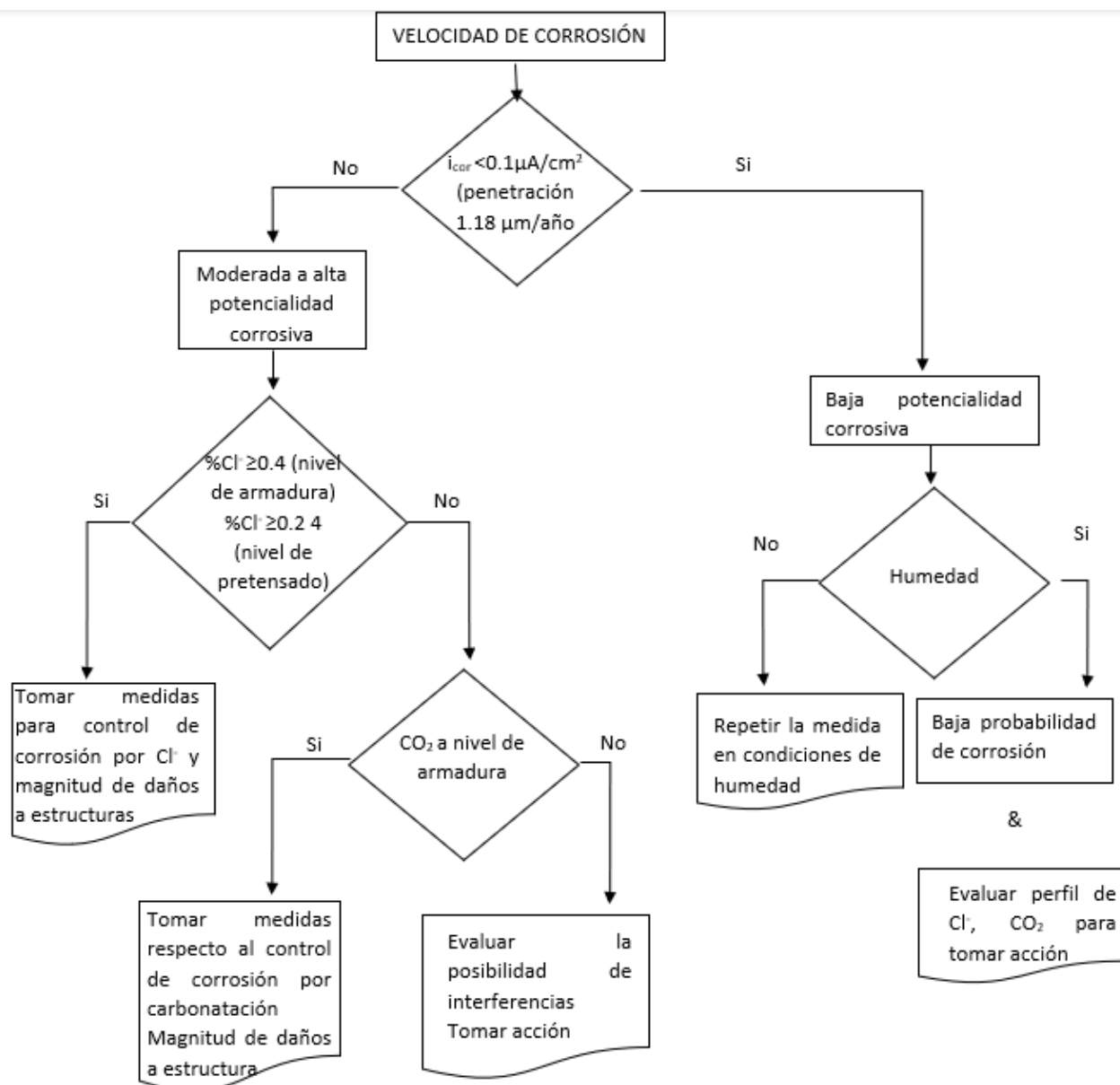
**Figura 15.** Espesor de recubrimiento y la corrosión. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Pàg. 145.

**Calidad del Hormigón: Evaluación y Diagnóstico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable principal la calidad del hormigón. (Ver Imagen 16).



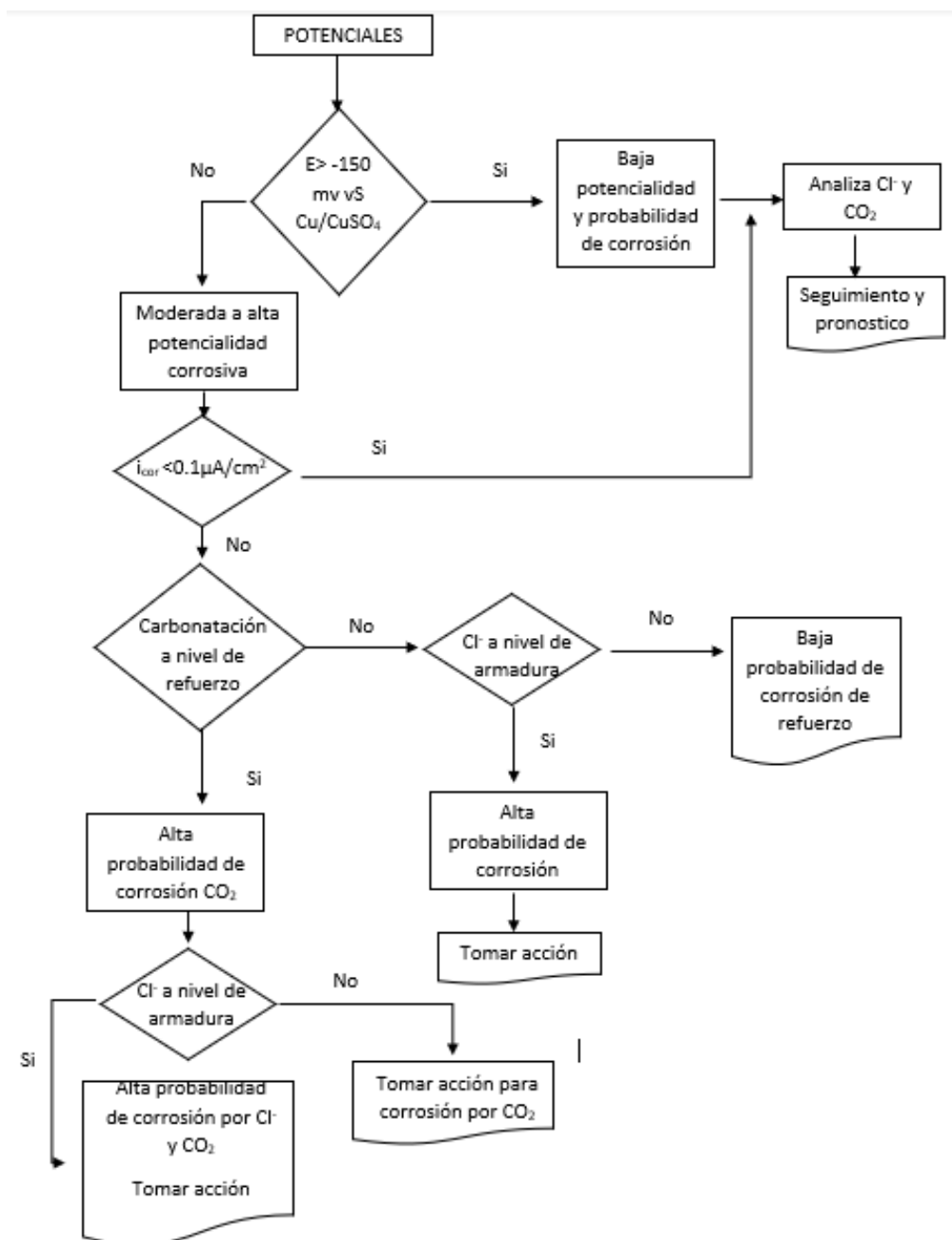
**Figura 16.** Calidad del hormigón y la corrosión. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Pàg. 144.

**Velocidad de Corrosión: Evaluación y Diagnóstico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable principal la Velocidad de Corrosión. (Ver Imagen 17).



**Figura 17.** Diagnostico por velocidad de corrosión. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pàg. 144.

**Potencial; Evaluación y Diagnostico.** A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable los potenciales. (Ver Imagen 18).

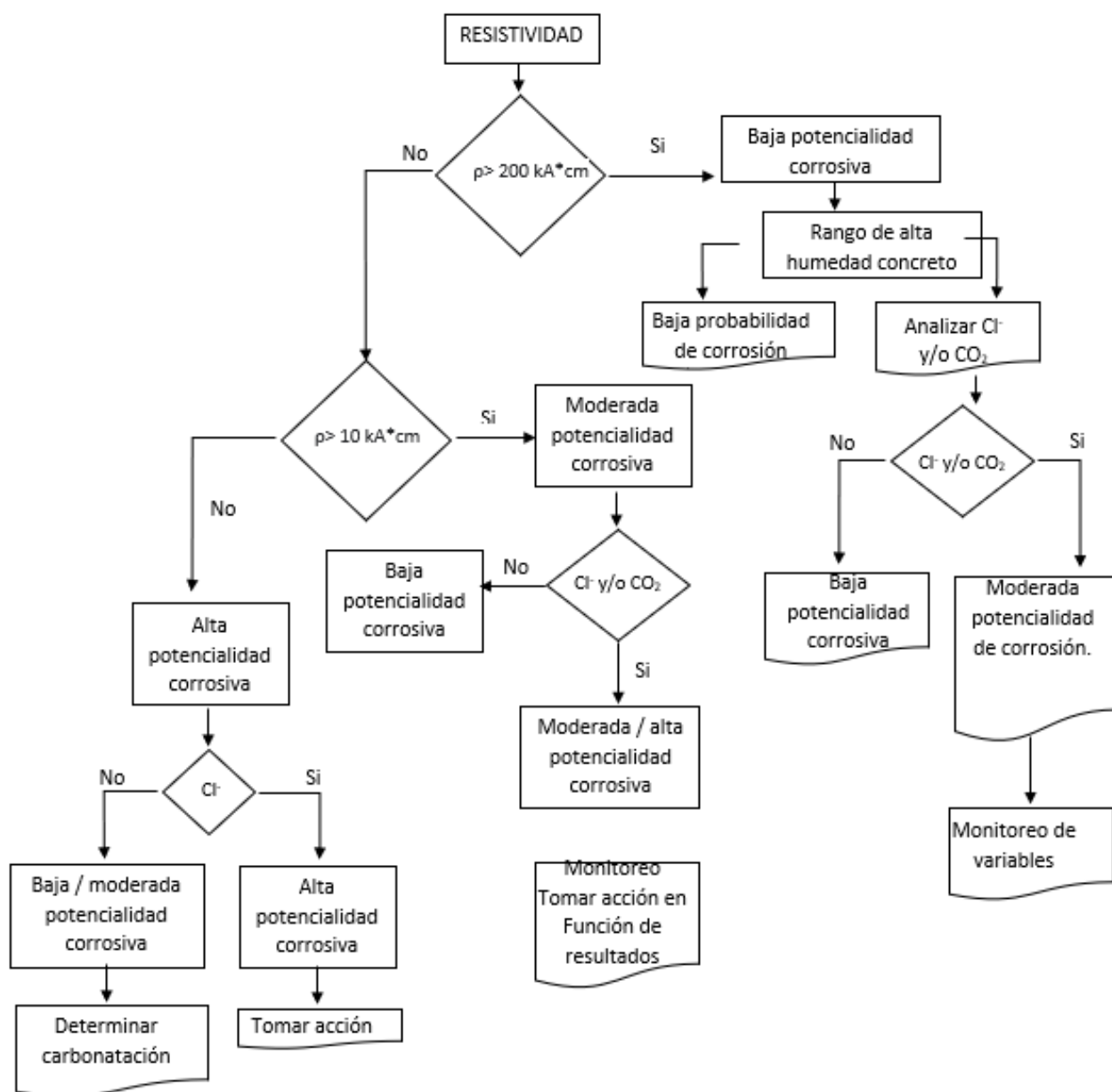


**Figura 18.** Diagnostico por potencial. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pàg.144.

### Resistividad del Hormigón: Evaluación y Diagnóstico.

A continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar para determinar la probabilidad de corrosión considerando como variable la resistividad eléctrica. (Ver Imagen 19).





**Figura 19.** Resistividad del hormigón y la corrosión. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Pàg. 144.

### Diagrama de flujo. Resistividad del Hormigón: Evaluación y Diagnóstico A

continuación, se presentan condiciones que se deben evaluar en una estructura para determinar la probabilidad de corrosión considerando. (Ver Imagen 20).

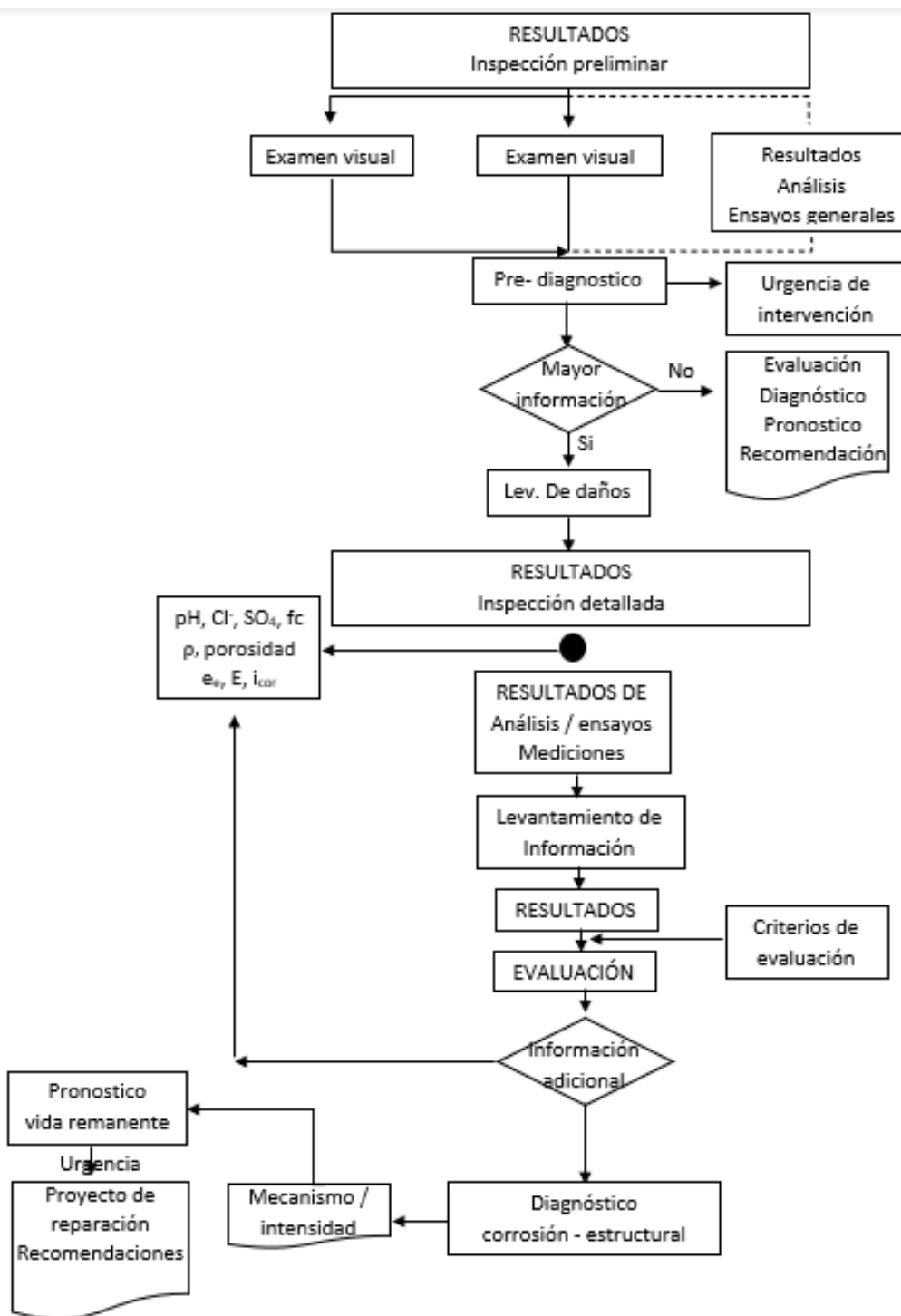


Figura 20. Evaluación por corrosión. Fuente: Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pàg. 144.

#### 4. Correlación entre las propiedades de los materiales estructurales y la corrosión.

##### 4.1. Correlación entre resistencia a la compresión del concreto y corrosión del refuerzo.

A continuación, se presentan datos, tablas y graficas donde se analiza la perdida de la resistencia a la compresión del concreto reforzado  $f'c$  para diferentes grados de corrosión. Los datos que se muestran a continuación son resultados de ensayos de diferentes investigaciones, donde se aplican métodos de corrosión acelerada en probetas de concreto reforzado. En el inciso 2.7.1.4 del marco teórico se define exactamente el grado o nivel de corrosión para efectos de estudio de esta investigación. **La tabla 2** muestra las características de las probetas ensayadas en las investigaciones.

**Tabla 2.**

*Características en común de los elementos ensayados encontrados en diferentes investigaciones.*

<b>características en común (ensayos de laboratorio de investigaciones de la literatura científica)</b>	
Elementos de ensayo de laboratorios	probetas cilíndricas de los siguientes tipos: 1. (100x300) 2. (150x300)
Temperaturas de ensayo	Varían (20°C - 25°C)
Método de corrosión	Electroquímica acelerada
Relación w/c	Varían (0.40 - 0.55)
Agregados	Agregados finos Max(4.75mm) Agregado grueso grava tamaño Max (9.5mm)

*Nota. Fuente:* Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, en la **tabla 3**, se muestran los datos de diferentes autores utilizados para crear una correlación entre el grado de corrosión y la disminución de resistencia a la compresión en términos de porcentajes.

**Tabla 3.**

*Datos de consolidado de Porcentaje de nivel de corrosión y porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión.*

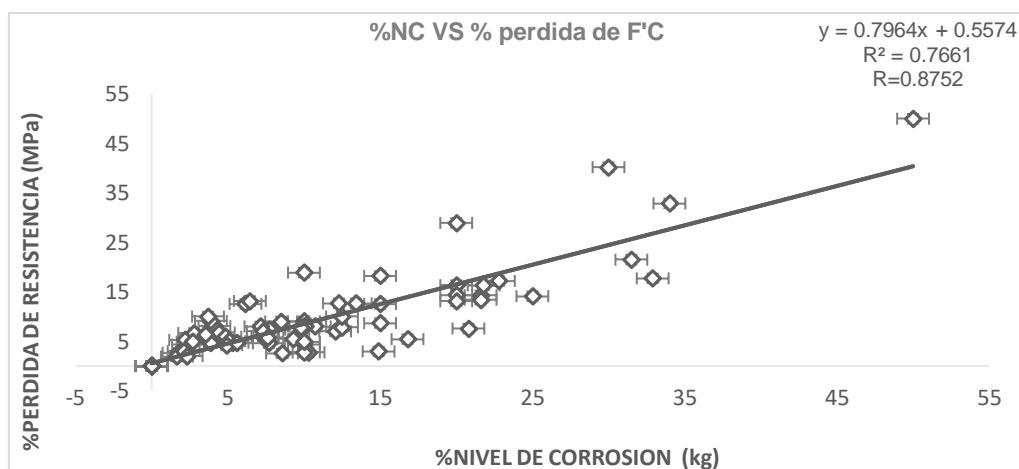
<b>%Nivel de corrosión NC</b>	<b>%Reducción de f'c</b>	<b>Autores para cada valor</b>
0	0	
1.76	2.7	
2.39	4.3	
2.2	5.3	Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure
4.12	8.1	
0	0	
3.86	4.69	
5.31	4.69	
4.41	6.7	
6.16	12.6	Mohsen Ali, et. al (2016)
8.56	2.6	
4.84	5.9	
7.73	7.3	
0	0	
1.66	1.90	
2.79	6.67	
2.69	4.9	
3.89	9.1	
6.45	13.1	
3.52	6.3	
0	0	
10	9.04	Ultimate Capacity of Corroded Statically Indeterminate Reinforced Concrete Members
15	18.20	
20	16.4	
0	0	
10	8.0	Fernandez I. et. al (2018)
15	8.67	
20	14.3	
0	0	
10	4.38	
15	12.5	
20	13.1	
0	0.00	Compressive Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns.
10	18.87	
20	28.92	Radhi1 et. al (2021)
30	40.20	
0	0	
2.1	3	Effect of transverse reinforcement corrosion on compressive strength reduction of stirrup-confined concrete: an experimental study
0	0	
2.3	2	
3.7	10	
0	0	

7.14	8	
8.5	9	
10.71	8	Goharrokhi, et. al (2019)
0	0	
5.1	5	
10.1	8	
12.05	7	
<hr/>		
0	0.0	
4.9	4.2	
9.8	7.7	
0	0	
7.3	5.9	
12.5	7.8	
21.6	14.3	
0	0	
7.3	7.05	Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement
12.5	10.01	
21.6	13.39	
0	0	
7.7	4.61	
10.3	2.75	Son Vu, et. al (2017)
12.3	12.68	
0	0.0	
5.6	4.6	
10	2.7	
13.4	12.7	
0	0.0	
14.9	2.9	
20.8	7.6	
25	14.1	
0	0.0	
16.8	5.4	
21.8	16.3	
31.5	21.5	
0	0.0	
7.6	5.8	
22.8	17.2	
32.9	17.7	
0	0.0	
9.3	5.5	
10	4.9	
<hr/>		
0	0	
34	23.5	Di Sarno & Pugliese (2021)
50	50.0	

**Fuente:** Elaboración propia. Martínez Jorge, Ospino Freddy

**NOTA.** En anexos B, se puede encontrar la totalidad de los análisis realizados a todas las investigaciones encontradas que nos permiten crear la correlación.

A continuación, se muestra una gráfica que representa la relación entre la pérdida de resistencia a la compresión de concreto  $f_c$  y el nivel de corrosión ambos en porcentajes (Ver figura 21).



**Figura 21.** Consolidado de porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. **Fuente:** Elaboración propia con datos de la literatura científica.

En la Figura 21, se observa que en los rangos de nivel de corrosión al igual que de resistencia a la compresión entre 0-15% hay una mejor tendencia y menor desviación de los datos de la gráfica, lo cual nos indica que, en este intervalo existe un menor error relativo al utilizar la correlación. Considerando lo anteriormente mencionado **¿por qué el  $R^2$  no tiene un valor más alto al obtenido?** Cómo se ha explicado anteriormente en los ensayos de corrosión acelerada elaborados en probetas de concreto armado para comparar la pérdida de resistencia a la compresión por ciertos porcentajes de corrosión del acero, están sujetos a ciertas características que varían en rangos como por ejemplo la relación agua cemento (0.4 - 0.55), las dimensiones de las probetas, la temperatura etc. dichas características particulares hacen que se requiera una gran cantidad de datos para conocer con más exactitud el comportamientos de la gráfica de %disminución de resistencia a la compresión vs % de corrosión. Por lo anterior, se considera importante la elaboración de más ensayos de laboratorio para mejorar la dispersión de los datos y poner obtener una correlación más ajustada.

#### 4.2. Correlación definida por el método de mínimos cuadrados.

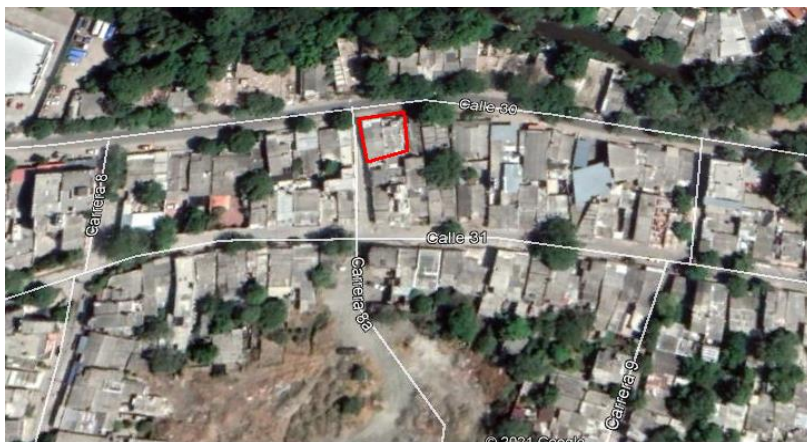
Se presenta a continuación en la **ecuación 5** correlación que relaciona el % de pérdida de resistencia  $f'c$  para cierto grado o porcentaje de corrosión del refuerzo. La ecuación nos indica que si existe un 1% de corrosión del refuerzo se produce una reducción de  $f'c$  del 1.34%. Esta ecuación podría ser utilizada siempre y cuando las características de la estructura que se estudia sean similares a las características de los materiales de las probetas ensayadas los cuales se define en la tabla 2

$$\downarrow F'C(\%) = 0.7964 NC(\%) + 0.5574 \quad \text{(Ecuación. 5)}$$

Donde:  $\downarrow F'C$  es la disminución de la resistencia a la compresión y  $NC$  es el Nivel de Corrosión.

#### 5. Definición de la edificación convencional (caso de estudio).

La estructura se ubica en la ciudad de Santa Marta, capital del departamento del Magdalena-Colombia sobre la calle 30 con Carrera 8a, la edificación se compone de 5 niveles y es de uso residencial. Cada piso cuenta con un área de  $182.6\text{m}^2$  con 2 apartamentos por piso, el apto tipo 1 tiene  $74.3\text{m}^2$  y el apto tipo 2 tipo tiene  $108.3\text{m}^2$ . La figura 22 muestra la ubicación geografica de la edificación de estudio.



**Figura 22.** Ubicación de la zona del proyecto. **Fuente.** Adaptado de Google Earth Pro.

La NSR, (2010) Establece los parámetros de diseño utilizados en esta investigación para edificaciones. Referente a esto SAP 2000 20 Software de análisis y diseño estructural es utilizado para la modelación de la estructura, la cual es comprobada con memorias de cálculo de diseños elaboradas de forma manual.

La ciudad de Santa Marta se encuentra en zona de amenaza sísmica intermedia, por lo cual se diseña para un grado de disipación de energía moderado, en la zona se encuentra un suelo tipo C, obtenido de un estudio de suelos (**Ver en anexos E**).

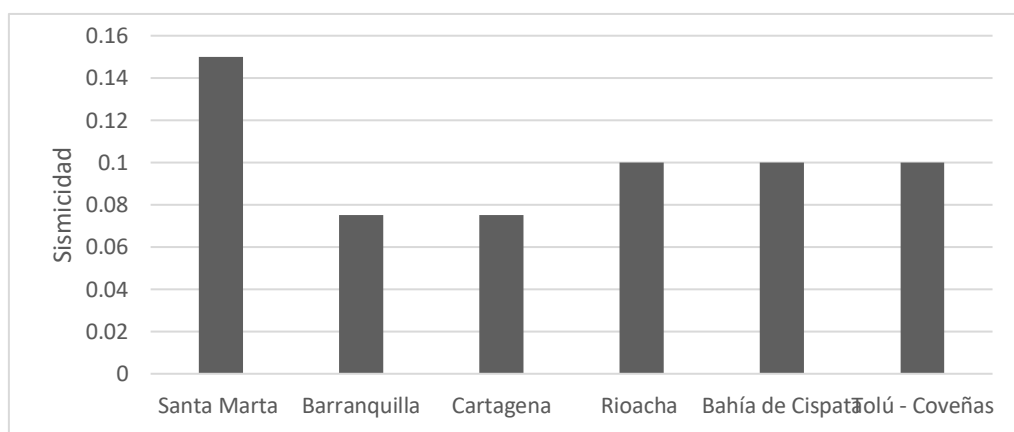
### **5.1. Caracterización de la zona de estudio.**

Alcaldía Distrital de Santa Marta, (2021). La ciudad de Santa Marta localizada en el departamento de la Magdalena al norte de Colombia, ubicada en las coordenadas geográficas 11° 14' 50" de latitud norte y 74° 12' 06" de latitud oeste, embarga una superficie de 239.35 km<sup>2</sup> a una altura promedio de 2 msnm pero con una diferencia de altura que va, en el territorio del municipio, desde el nivel del mar hasta los 5.775 msnm en el Pico Cristóbal Colón, que es el más elevado de toda Colombia ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta, se encuentra a 93 km de la ciudad de Barranquilla y el perímetro limita por el norte y el oeste con el Mar Caribe, por el este con el departamento de La Guajira y por el sur con los municipios de Aracataca y Ciénaga. La ciudad de Santa Marta se caracteriza por tener la montaña más alta del mundo al nivel del mar, además posee un clima cálido y seco, con precipitación media anual de 362 mm, humedad relativa del 77% y rango de temperatura entre los 23°C–32°C.



**5.1.1 Sismicidad** Luego de realizar una revisión bibliográfica se encontró un solo movimiento sísmico en todo el departamento del Magdalena específicamente en la ciudad de Santa Marta. De acuerdo con lo anterior esa zona fue categorizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS en un mapa de zonificación y amenaza sísmicas relativa con un grado de amenaza media y una un coeficiente de aceleración pico efectivo de 0.15 caracterizándose así por ser un área de amenaza intermedia por sismicidad con presencia de fallas geológicas activas, ya que pueden presentarse altas magnitudes de sismos con deslizamientos inducidos. (INGEOMINAS, 1999).

Realizando una comparación con otras zonas de la costa como Barranquilla, Cartagena, Riohacha, Tolú y Coveñas. La ciudad de Santa Marta cuenta con un mayor grado de amenaza sísmica y aceleración pico efectiva como se ve representado en la figura 23.



**Figura 23.** Coeficiente de aceleración pico efectivo según el grado de amenaza sísmica. **Fuente:** Adaptado de INGEOMINAS, 1999.

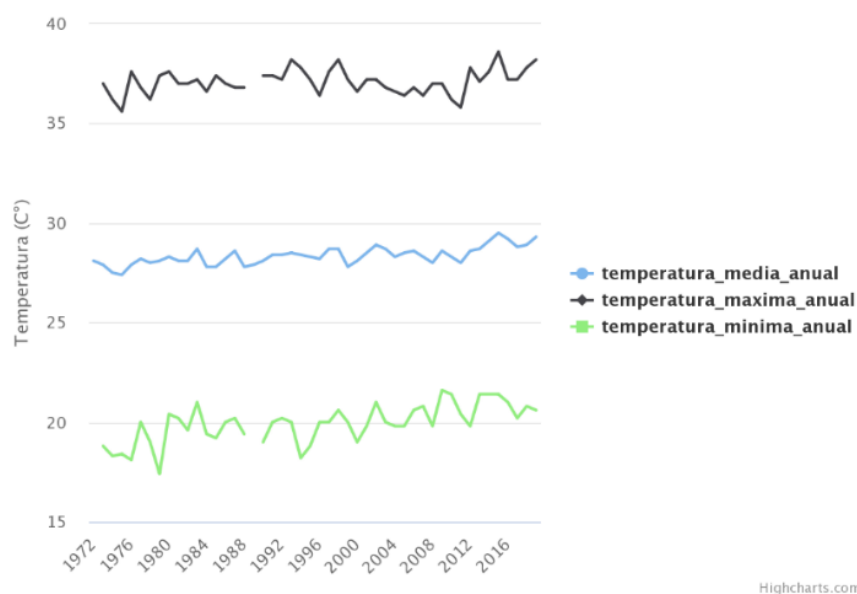
## 5.2. Parámetros ambientales de la ciudad de Santa Marta.

Chávez Ulloa, et. al (2013). Realizan una investigación donde se estudian parámetros ambientales y como estos contribuyen a la corrosión, afirman que, al incrementar la precipitación pluvial del medio, disminuye la resistividad en la interfaz de acero y concreto.

Además, la variación de la humedad relativa refleja cambios en la Velocidad de corrosión  $E_{corr}$  e Intensidad de corrosión  $I_{corr}$ .

Dentro de los parámetros ambientales de la ciudad se encuentran algunos que en particular son de gran importancia para determinar el grado de corrosión que ataca a las armaduras embebidas en concreto como lo son los siguientes:

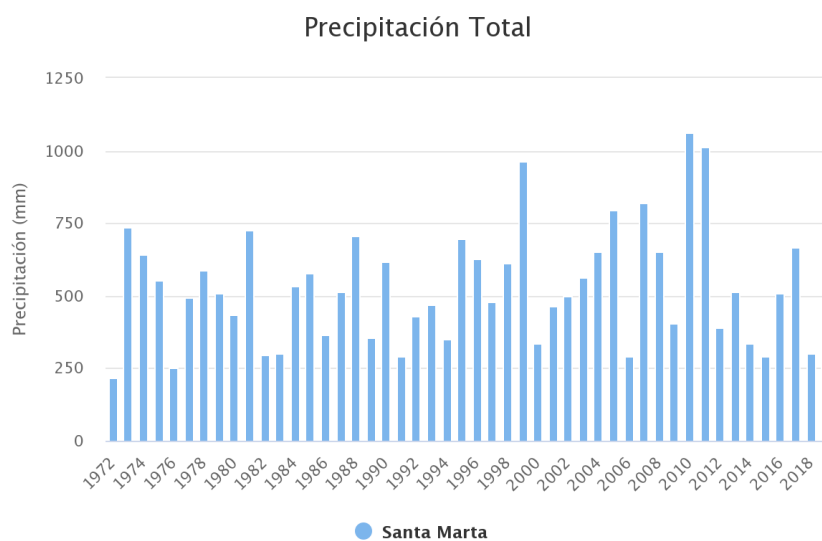
- **Temperatura máxima del aire:** la temperatura máxima del aire corresponde al valor más alto de temperatura registrado en un lapso, en una estación de monitoreo (IDEAM,2005). La **Figura 24** muestra datos de temperatura anual registradas en la ciudad de Santa Marta en la cual muestra para el año 2019 como temperatura máxima 38.2°C, una temperatura media de 29.3°C y una mínima de 20.6°C.



**Figura 24.** Temperatura media, máxima y mínima anual registradas en Santa Marta entre 1972 y 2019. **Fuente.** Tomado de: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <http://www.ideam.gov.co/>

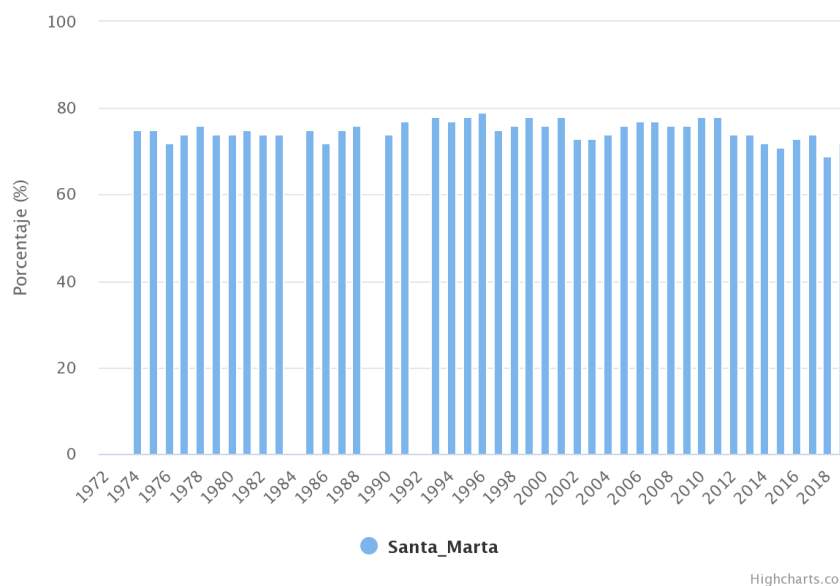
- **Precipitación total anual:** La Precipitación total corresponde a la cantidad de agua que llega al suelo en forma de lluvia, rocío, granizo o nieve, contabilizada durante  $i$  períodos, en la estación  $j$  durante el tiempo  $t$  (IDEAM, 2005). La ciudad de Santa Marta

registra una precipitación total anual para el año 2019 de 345.4 mm como lo muestra la Figura 25:



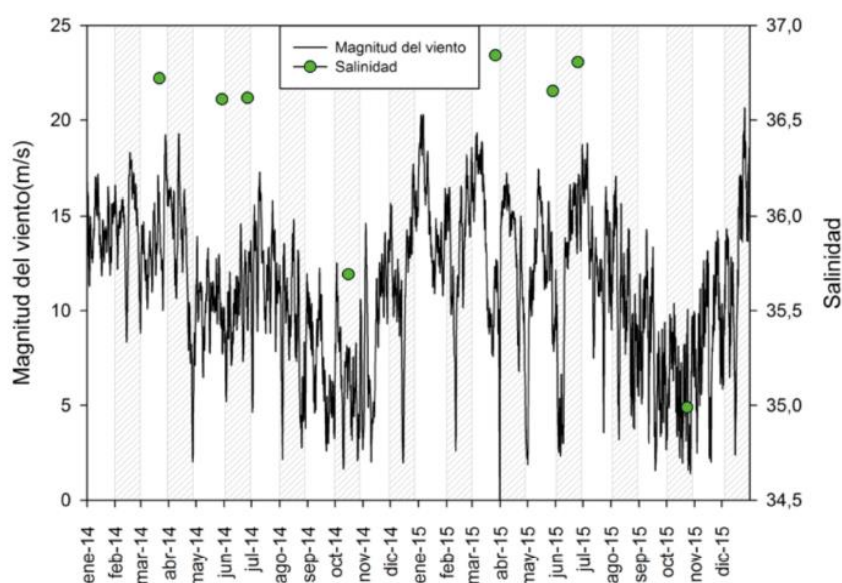
**Figura 25.** Precipitación total anual registradas en la ciudad de Santa Marta desde 1972 hasta 2019. **Fuente.** Tomado de: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) <http://www.ideam.gov.co/>

- Humedad relativa promedio:** La humedad relativa es el vapor de agua que existe en una masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total que existiría si el aire estuviese saturado a esta temperatura. El dato mensual se calcula como el promedio aritmético de los valores de humedad relativa diaria del aire en un determinado mes (IDEAM, 2005). **La figura 26** muestra datos de humedad relativa promedios registrados por la estación hidrológica ubicada en el aeropuerto Simón Bolívar donde muestra que para el año 2019 fue del 72%.



**Figura 26.** Humedad relativa promedio anual registradas en Santa Marta desde 1972 hasta 2019. **Fuente.** Tomado de: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) <http://www.ideam.gov.co/>

- **Salinidad en el ambiente:** una investigación realizada por integrantes del grupo de investigación Geociencias perteneciente al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras afirma que el valor de salinidad en el ambiente ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) es de  $34.99 \pm 0.03$  para el mes de octubre del año 2015 como lo muestra en la imagen 27. (Bastidas Salamanca et al, 2016).



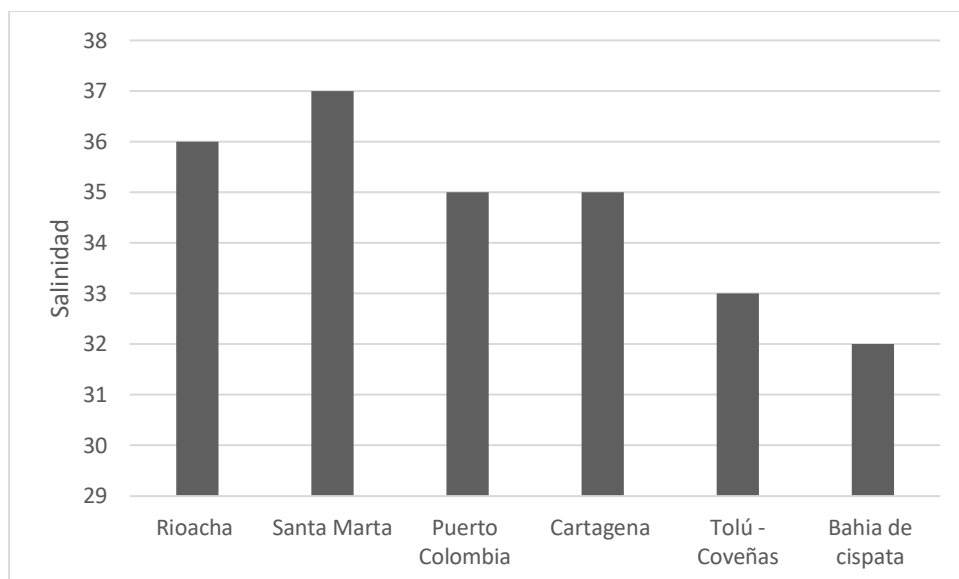
**Figura 27.** Serie de tiempo para los datos de salinidad en el ambiente registradas en la ciudad de Santa durante el periodo de enero 2014 – diciembre 2015. **Fuente:** Bastidas M. et. al (2015).

### 5.3. Cloruros en la zona de estudio.

La alta concentración de salinidad es uno de los factores ambientales que podría acelerar el proceso de corrosión en las estructuras de concreto reforzado. Referente a esto, Paredes et. al (2013) en su investigación sobre la Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: Vigas y Columnas. Han concluido que, en ambientes salinos, además con relaciones w/c baja y recubrimientos mínimos, el efecto de los iones de cloruro puede afectar al acero, principalmente de manera localizada, produciéndose una corrosión de tipo picadura, que afecta la sección.

Para la selección de la zona de estudio se realizó una comparación entre la cantidad de cloruro presente en las aguas superficiales de varios municipios y ciudades del Caribe colombiano que se encuentran ubicadas en las costas marítimas los cuales son Riohacha, Bahía Concha, Salgar, Golfo de Morrosquillo y Cartagena ya que son consideradas turísticas y tienen una cantidad considerable de edificios construidos. Para este proyecto de investigación se decidió trabajar con la zona que mayor cantidad de salinidad tenga.

De acuerdo con el informe técnico realizado por la Red de vigilancia para la conservación y protección de aguas marinas y costeras colombianas (REDCAM) y por los datos obtenidos por el muestreo realizado por Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” INVEMAR (2016), indica la cantidad de salinidad encontrada en las aguas superficiales de las siguientes zonas: Riohacha con valor de 36 gr/L, Santa Marta con 37 gr/L, Puerto Colombia con 35 gr/L, Cartagena con 35 gr/L, Tolú – Coveñas con 33 gr/L y Bahía de Cispata con 32 gr/L. De acuerdo con lo anterior la zona con mayor cantidad de salinidad en sus aguas superficiales se encuentra en la ciudad de Santa Marta específicamente en la localidad del Rodadero con un valor de 37 gr/L, otra de las razones por lo cual, esta ciudad escogida para la ubicación de la edificación de estudio. La Figura 28 resume la información de salinidad en aguas superficiales en algunas zonas costeras.

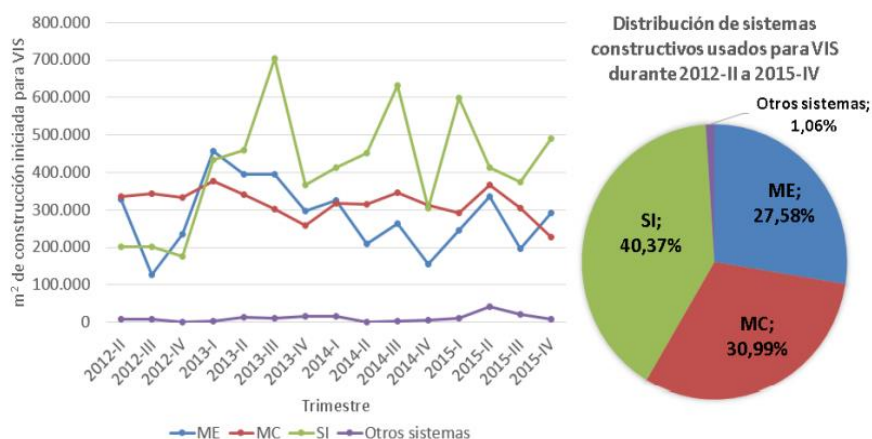


**Figura 28.** Salinidad de agua superficial en las estaciones de muestreo en departamentos de la costa caribe colombiana Fuente: REDECAM, (2016).

#### 5.4. Sistema estructural.

**5.4.1 Número de pisos.** Para efectos de estudio se debe definir un número de pisos de la estructura que sea predominante en el ámbito de construcción en Colombia. Referente a esto El tiempo, (2015) Un informe realizado señala que la mayoría de los proyectos para licencias de edificaciones residenciales serían de alturas entre 5 y 7 pisos en promedio. Solo una contempla 26 pisos; tres, entre 20 y 23; dos con 15 y otros dos con 16.

**5.4.2 Tipo de sistema.** Según cifras de la Cámara Colombiana de la Construcción Camacol (2016), se puede estimar lo siguiente: entre el segundo trimestre del año 2012 y el cuarto trimestre del año 2015, para las 16 principales áreas urbanas del país, el área de construcción iniciada para VIS según sistema constructivo ha sido prácticamente dominada por tres sistemas: el 40,37% del total correspondió a sistemas industrializados (SI), el 30,99% a mampostería confinada (MC) También conocido como sistema tradicional en Colombia, el 27,58% a mampostería estructural (ME), y el 1,01% a otros sistemas, la figura 29 presenta un resumen de la información. (García López, et. al 2016).



**Figura 29.** Distribución de sistemas constructivos usados para VIS desde el segundo trimestre de 2012 hasta el cuarto trimestre de 2015. *Fuente:* García et. al (2016).

### 5.5. Caracterización del sistema estructural.

De acuerdo con los fundamentos presentados anteriormente se define para el caso de estudio una edificación de 5 niveles ubicada en la ciudad de Santa Marta, sistema estructural compuesto por un pórtico en el cual los elementos estructurales vigas y columnas son los que reciben las cargas verticales y fuerzas horizontales.

### 5.6. Materiales.

**5.6.1. Resistencia a la compresión del concreto  $f'_c$ .** Según NSR-10 título C inciso 21.1.4 para zonas donde se requiere capacidad de disipación de energía moderada DMO (Caso Santa Marta) y especial DES la resistencia específica a la compresión no debe ser menor a  $f'_c$  21 MPa.

**5.6.2. Recubrimiento de concreto.** Según la NSR-10 título C inciso 7.7.1 el recubrimiento especificado para el refuerzo no debe ser menor a lo siguiente.

- Concreto colocado contra el suelo y expuesto permanentemente a él (7.5cm).
- Concreto expuesto al suelo o a la interperie barras No 6 a la No 18 (5cm).
- Concreto expuesto al suelo o a la interperie barras No 5 y menores (4cm).

- Concreto No expuesto al suelo ni a la interperie: losas, muros, viguetas barras No 14 y No 18 (4cm).
- Concreto No expuesto al suelo ni a la interperie: losas, muros, viguetas barras No 11 y menores (2cm).
- Concreto No expuesto al suelo ni a la interperie: vigas y columnas armadura principal, estribos, espirales (4cm).

**5.6.3. Módulo de elasticidad del concreto E.** En caso de que no se disponga de este Según la NSR-10 Título C, Inciso C8.5.1 Para concretos de densidad normal el valor del modulo de elasticidad  $E_c$  puede tomarse de la siguiente forma (ver ecuacion 6).

$$E = 4700\sqrt{f'c} \quad \text{(Ecuación. 6)}$$

**5.6.4. Resistencia a la fluencia del acero  $f_y$ .** La NSR-10 título c incisos en C.19.3.2 y C.21.1.5.2 establece que la resistencia a la fluencia  $f_y$ , especificada es de 420 MPa para cascarones, losas plegadas, pórticos especiales resistentes a momentos y muros estructurales especiales.

**5.6.5. Módulo de elasticidad del refuerzo.** La nsr-10 en el titulo C inciso 8.5.2 establece que el modulo de elasticidad  $E_s$  para el acero de refuerzo no preesforzado puede tomarse como 200.000 MPa.

## 5.7. Características de los materiales usados en la estructura.

Siguiendo las directrices de la NSR-10 las características de los materiales quedan definidos de la siguiente forma:

Concreto estructural con  $f'c=28\text{MPa}$ , para elementos tipo vigas y columnas con recubrimiento de 4cm al refuerzo, y el modulo de elasticidad del concreto dado por:

$$E = 4700\sqrt{f'c}$$

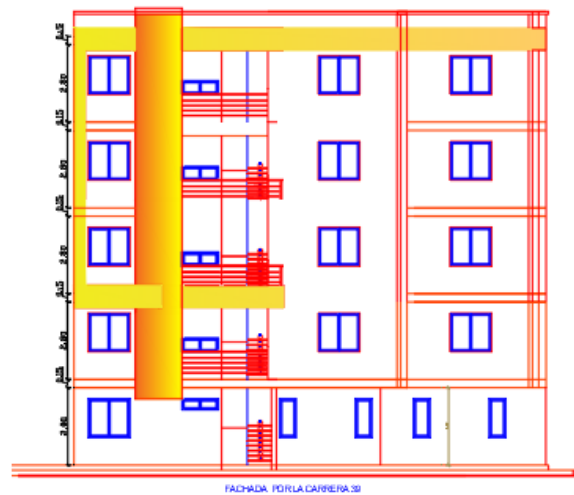


Para el acero de refuerzo la resistencia a la fluencia es de  $f_y$ : 420 MPa y el modulo de elasticidad definido es  $E_s$ = 200.000 MPa.

## 6. Diseños arquitectónicos, análisis y diseño estructural.

### 6.1 Diseños arquitectónicos edificación de 5 niveles.

**6.1.1 Diseños de fachada.** A continuación (Figura 30 y 31), se muestra fachada diseño arquitectónico de edificación de 5 niveles, la separación entre pisos es de 2.875m, las ventanas cuentan con dimensiones de 150x140cm y las ventanas de balcón 130x50cm, la altura del muro de cubierta es de 1.5m, el área de cada piso es de 182.6m<sup>2</sup>



**Figura 30.** Plano arquitectónico de edificación 5 niveles. **Fuente:** Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.



**Figura 31.** Plano arquitectónico de edificación 5 niveles. **Fuente:** Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**6.1.2 Planta arquitectónica pisos 1-2-3,-4 y 5.** A continuación en la figura 32 se muestra la planta arquitectonica de pisos 1,2,3,4 y 5. Cada uno de estos niveles cuenta con 2 apartamentos los cuales se distribuyen de la siguiente forma: Apto 1: 2 alcobas, 1 baño general, cocina, sala comedor y zona de labores. Apto 2: 3 alcobas, 1 baño general, 1 baño interno de alcoba, cocina, sala comedor, zona de labores y estudio. El apto tipo 1 tiene 74.3 m<sup>2</sup> y el apto tipo 2 tipo tiene 108.3m<sup>2</sup>

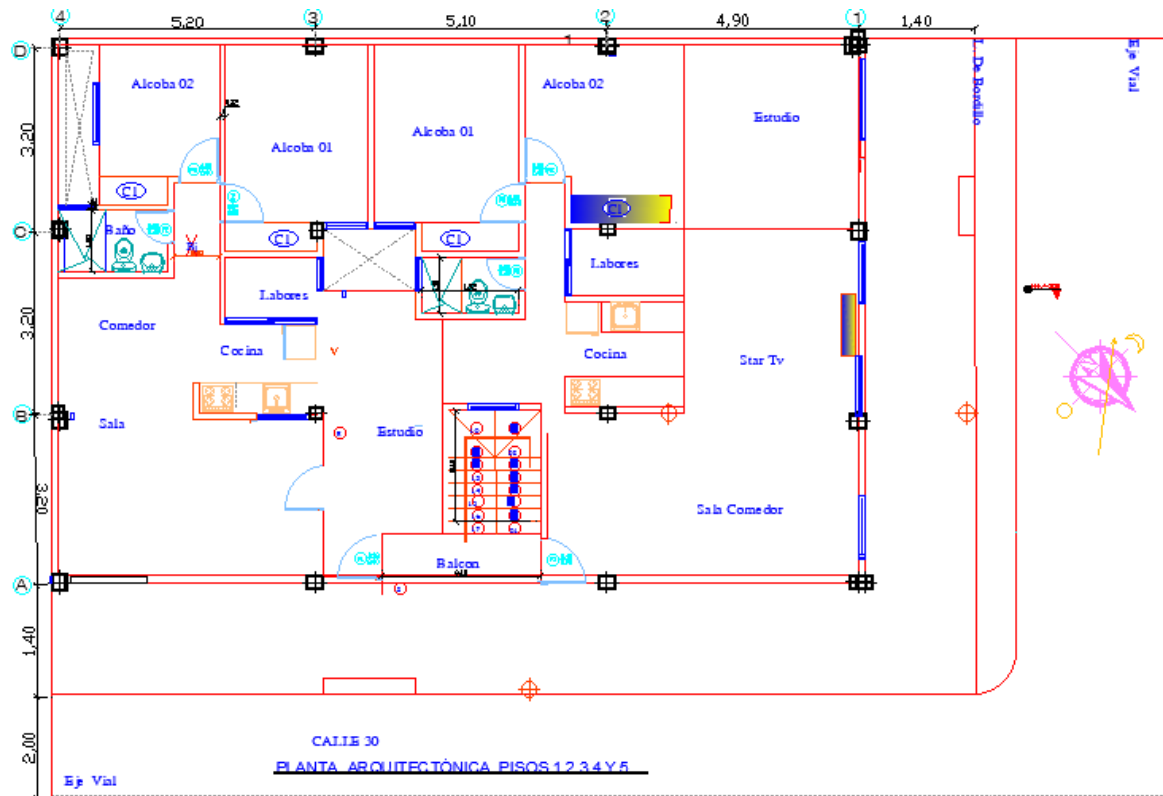
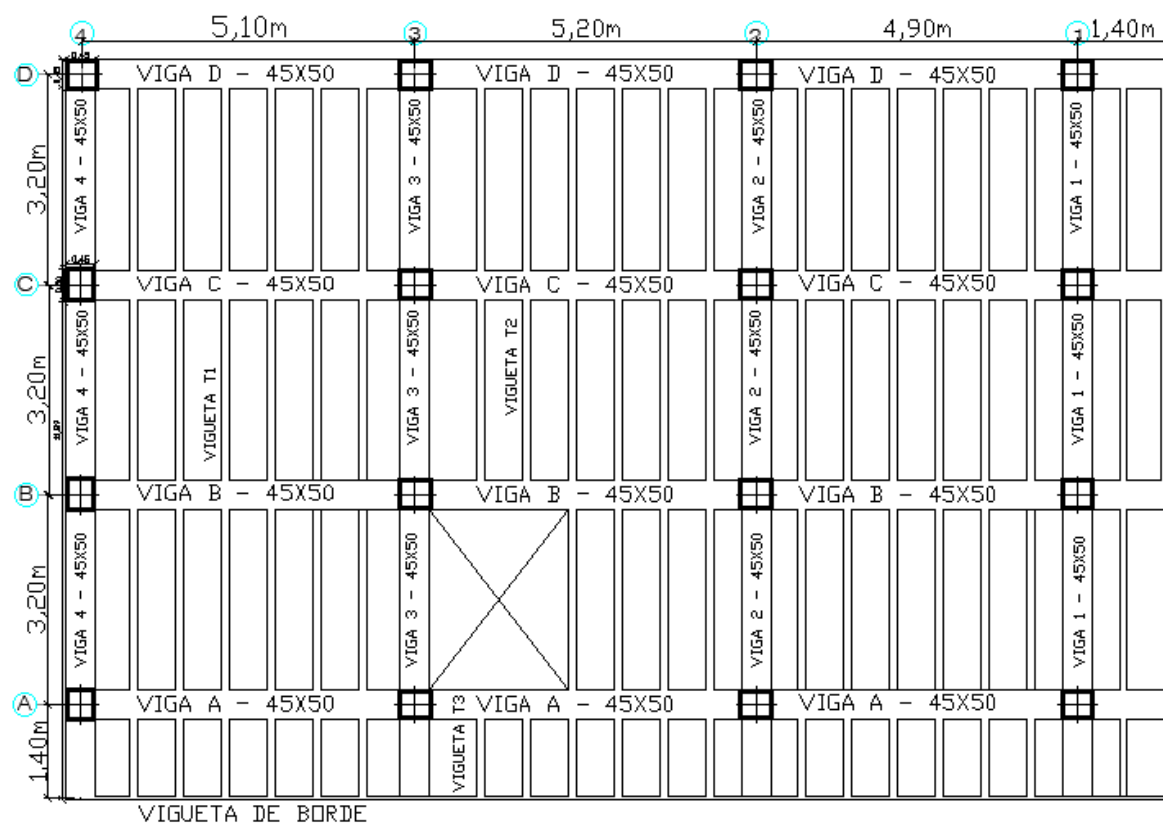


Figura 32. Planta arquitectónica Piso 1- 2-3-4 Y 5. Fuente: Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**6.1.3 Planta estructural.** A continuación, en la figura 33 se presenta la configuración propuesta de los elementos estructurales para cada piso, en dirección horizontal se compone de 4 vigas cargueras A-B-C-D, en dirección vertical se distribuyen 4 Vigas riostra 1-2-3-4 y en esa misma dirección 18 viguetas tipo 1, 2 viguetas tipo 2 y 2 viguetas tipo3, el sistema se conforma por 16 columnas por piso.



**Figura 33.** Distribución inicial de planta estructural Piso 1-2-3-4 Y 5. **Fuente:** Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

## 6.2 Predimensionamiento de Elementos Estructurales.

El Predimensionamiento de los elementos que conforman la estructura consiste en determinar dimensiones para que sean analizadas y luego verificadas si cumplen o no requisitos en diseño siguiendo los parámetros de la norma colombiana actual NSR-10.

### 6.2.1 Predimensionamiento de Vigas.

- **Predimensionamiento de vigas, Altura H.** A continuación, Según la NSR, (2010). se presenta el procedimiento empleado para el Predimensionamiento de elementos tipo viga, la **tabla 4** muestra las relaciones que se deben usar para determinar la altura del elemento según el tipo de apoyo.

**Tabla 4.**

*Predimensionamiento de vigas dependiendo de ciertas condiciones de apoyo. tabla de la NSR-10 Titulo C.*

Alturas o espesores mínimos de vigas no preesforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones				
Espesor mínimo, <b>h</b>				
	<b>Simplemente apoyadas</b>	<b>Con un extremo continuo</b>	<b>Ambos extremos continuos</b>	<b>En voladizo</b>
<b>Elementos</b>	Elementos que <b>NO</b> soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes			
<b>Losas macizas en una dirección.</b>	$\frac{l}{20}$	$\frac{l}{24}$	$\frac{l}{28}$	$\frac{l}{10}$
<b>Vigas o losas nervadas en una dirección</b>	$\frac{l}{16}$	$\frac{l}{18.5}$	$\frac{l}{21}$	$\frac{l}{8}$

*Nota.* Para el Predimensionamiento se utilizan las relaciones encerradas en la tabla. **Fuente:** Norma sismo resistente. Titulo C. NSR (2010, Pag 129).

A continuación, se presenta el desarrollo del Predimensionamiento de elementos tipo viga, se analizaron las luces más grandes junto con su correspondiente tipo de apoyo, donde, las situaciones más críticas poseen las siguientes características.

- Para luces con 1 extremo continuo L=5.1m.

$$h_{vig} = \frac{5.1}{18.5} = 0.27 \approx 0.3$$

- Para luces con ambos extremos continuos L=5.2m

$$h_{vig} = \frac{5.2}{21} = 0.247 \approx 0.25$$

- Para luces en voladizo L=1.4m.

$$h_{vig} = \frac{1.4}{8} = 0.17 \approx 0.20$$

Se selecciona el mayor valor de los obtenidos en el Predimensionamiento de acuerdo con las luces y el tipo de apoyo de las vigas, por lo cual, se define  $H=0.30m$

- **Predimensionamiento de vigas, Base B.** A continuación, se presenta criterios utilizados para el Predimensionamiento de vigas, Dimensión B.

**Zona de amenaza sísmica y grado de disipación de energía.** La NSR-10

Establece relaciones entre las diferentes zonas del país colombiano y la zona de amenaza sísmica, dicha zona de amenaza también es relacionada con la capacidad de disipación de energía que debe tener una estructura específica (**Ver tabla 5**).

**Tabla 5.**

*Relación entre diferentes ciudades de Colombia y la zona de amenaza sísmica.*

**Valor de Aa y de Av para las ciudades Capitales de departamento**

<b>Ciudad</b>	<b>Aa</b>	<b>Av</b>	<b>Zona de amenaza sísmica</b>
Barranquilla	0.1	0.1	Baja
Bogotá D.C.	0.15	0.2	Alta
Cartagena	0.1	0.1	Alta
Montería	0.1	0.15	Intermedia
Riohacha	0.1	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.1	0.1	Baja
Santa Marta	0.15	0.1	Intermedia
Sincelejo	0.1	0.15	Intermedia
Valledupar	0.1	0.1	Baja

**Nota.** Santa Marta se encuentra en zona de amenaza sísmica Intermedio. **Fuente:** Norma Sismo Resistente NSR-10, Título A.

A continuación, se relaciona el grado de disipación de energía para análisis y diseño de acuerdo con la zona de amenaza sísmica, se observa que para zona de amenaza intermedia se debe ejecutar el diseño estructural en DMO (Ver tabla 6).

**Tabla 6.**

*Grados de capacidad de disipación de energía en función de la amenaza sísmica.*

CAPACIDAD DE DISIPACIÓN ENERGÍA	ZONA DE AMENAZA SÍSMICA		
	BAJA	INTERMEDIA	ALTA
MÍNIMA DMI	✓	no	no
MODERADA DMO	✓	✓	no
ESPECIAL DES	✓	✓	✓

*Nota.* Para zona de amenaza intermedia se diseña en DMO. *Fuente:* Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, AIS (2012).

En lo siguiente, se establece por Predimensionamiento del lado B de los elementos tipo viga considerando criterios de la NSR-10. En C.21.3.4-Vigas con capacidad moderada de disipación de energía (DMO)

C.21.3.4.1-El ancho del elemento  $b_w$ , no debe ser menos que 200mm

C.21.5.1.3-El ancho del elemento  $b_w$ , no debe ser menor que el más pequeño de 0.3h y 250mm.

- Opción A 200mm
- Opción B  $0.3h=90\text{mm}$
- Opción C 250mm

Como se muestra anteriormente se obtiene un valor de  $B=0.25\text{m}$  en el caso de los elementos tipo vigas.

**6.2.2 Predimensionamiento de viguetas.** De acuerdo con NSR-10 en C.8.13

“Viguetas en losas nervadas” se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\begin{aligned} \text{Ancho de viguetas: } b_w &> 10\text{cm} \\ b_w &> h_{vig}/5 \Rightarrow 6\text{cm} \end{aligned}$$

De acuerdo con lo anterior se define por construcción anchos de viguetas de 12cm cumpliendo con los requisitos de la NSR-10.

Separación máxima de viguetas: C.8.13.3 Para losas nervadas en una dirección

$$S_{vig} < 1.20\text{m}$$

$$S_{vig} < 2.5h_{vig} \rightarrow S_{vig} < \mathbf{0.75}$$

**6.2.3 Predimensionamiento de losa.** De acuerdo con la máxima luz entre

viguetas y considerando la tabla C.9.5(a) de la NSR-10 se calcula el espesor de la losa superior.

$$h_{losa} = \frac{L}{20} = \frac{0.75\text{m}}{20} = 0.0375 \approx 0.05\text{m}$$

Se define un espesor de losa de 5cm, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma sismo resistente NSR-10.

**6.2.4 Predimensionamiento de elementos tipo columnas.** A continuación, se presentan los criterios utilizados para Predimensionamiento de columnas según la NSR-10.

- **NSR, (2010) En CR.10.8-Dimensiones de diseño para elementos a compresión(columnas).** Se dispone dimensiones mínimas de columnas con capacidad de disipación de energía (DMO) y especial (DES).

- **NSR, (2010) En C.21.6.1.1-** La dimensión menor de la sección transversal, medida de una línea recta que pasa a través del centroide geométrico, no debe ser menor que 300mm. Las columnas pueden tener una dimensión mínima de 0.25m, pero su área no puede ser menor que 0.009m<sup>2</sup>.



- **NSR, (2010) C.21.6.1.2** -La relación entre la dimensión menor de sección transversal y la dimensión perpendicular no debe ser menor que 0.4

#### Valores mínimos para cumplir

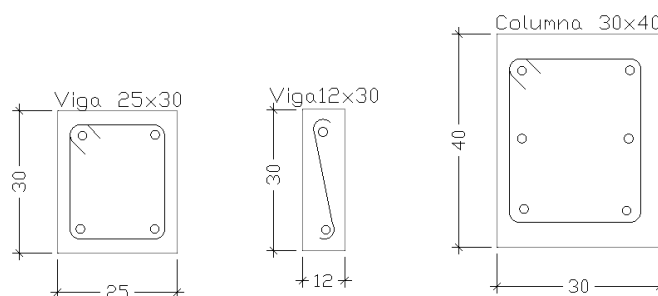
- Área Min:  $0.09\text{m}^2$
- $b/h$  Min: 0.4

Considerando los criterios anteriores se definen Columnas con sección de  $0.30\text{m} \times 0.40\text{m}$ .

- $0.30\text{m} \times 0.40\text{m} = 0.12 > 0.09\text{m}^2$  Cumple
- $0.30\text{m} / 0.40\text{m} = 0.75 > 0.4$  Cumple

#### 6.2.5 Secciones transversales Predimensionadas.

A continuación, en las figuras 34 y 35, se presenta el bosquejo de los elementos estructurales Predimensionados, los cuales estarán sometidos a un análisis estructural para verificar si cumplen o no condiciones requeridas de acuerdo con la NSR-10.



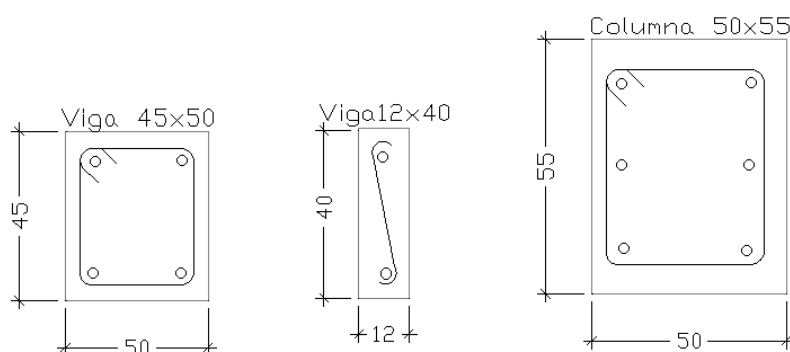
**Figura 34.** Dimensiones Predimensionadas de vigas y columnas **Fuente:** Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.



**Figura 35.** Bosquejo de losa  $e:5\text{cm}$  **Fuente:** Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

### 6.2.6 Secciones alternativas por no cumplimiento de derivas

Debido a que, las secciones de elementos estructurales definidas en el Predimensionamiento Posiblemente no cumplan con los requisitos de análisis por derivas de acuerdo con la NSR-10 (lo cual se sustenta más adelante). Además, considerando que el Predimensionamiento establece algunas veces secciones mínimas que probablemente se deban redefinir por no cumplimiento de la norma NSR-10. De acuerdo con lo anterior, Se definen otras secciones alternativas (Ver Figuras 36 y 37) tomando como punto de partida el Predimensionamiento realizado anteriormente y basándonos en la experiencia académica en el análisis y diseño de estructuras, dichas secciones posiblemente si cumplan con los desplazamientos máximos permitidos por la NSR-10.



**Figura 36.** Dimensiones de vigas y columnas *Fuente:* Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.



**Figura 37.** Bosquejo de losa  $e:5\text{cm}$  *Fuente:* Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

### 6.3 Análisis de cargas según lineamientos de la NSR-10.

Para el análisis de cargas se tiene en cuenta los valores establecidos en la NSR-10, Título B. A continuación, se muestra una tabla de cálculo para el peso de muros divisorias de

la edificación, posteriormente se muestra el cálculo de las cargas para los elementos No estructurales y estructurales, luego se presenta el peso de la edificación y el peso por cada piso. Inicialmente, presentamos los datos de entradas necesarios para realizar los cálculos (Ver tabla 7).

**Tabla 7.**

*Datos de entrada, necesarios para realizar el análisis estructural.*

<b>Datos de entrada</b>	
Densidad del concreto	23.5 kN/m <sup>3</sup>
Uso de la estructura	Residencial
Lugar	Santa Marta
Espesor de losa	5cm
Área de pisos	182.6 m <sup>2</sup>
Longitud de muros piso 1-2-3-4	84.5m
Longitud muros de cubierta	59m
Altura de muro de pisos	2.8m
Altura de muro de cubierta	1.5m

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta el cálculo de los muros divisorios, carga muerta que actúa en la estructura (Ver tabla 8).

**Tabla 8.**

*Cálculo del peso de muros divisorios en cada uno de los niveles de la edificación.*

Cálculo de cargas de muros de entrepiso y de cubierta.				NSR-10
Carga Referencia	Muros de piso (Mampostería bloque de arcilla, espesor 10cm pañetado ambas caras) Altura 2.8m	1.8	kN/m <sup>2</sup>	Tabla B 3.4.2-4
Carga Referencia	Muros de cubierta (Mampostería bloque de arcilla, espesor 15cm pañetado ambas caras) Altura 1.5m	2.5	kN/m <sup>3</sup>	Tabla B 3.4.2-4
Cargas de muro piso 1, 2, 3 y 4	$(C. Referencia \times H.muro \times Longitud muro)$ (Área piso)	2.33	kN/m <sup>2</sup>	Calculado
Cargas de muro de cubierta.	$(C. Referencia \times H.muro \times Longitud muro)$ (Área piso)	1.21	kN/m <sup>2</sup>	Calculado

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta el cálculo de los elementos No estructurales teniendo en cuenta el título B de la NSR-10. Carga muerta que actúa en la estructura (Ver tabla 9).

**Tabla 9.**

*Cálculo del peso de elementos No estructurales, de acuerdo con la NSR-10 título B.*

Elementos no estructurales				
Nº.	Elemento	Carga	Unidad	NSR-10
1	Muros (Mampostería bloque de arcilla, espesor 10cm pañetado ambas caras) Atura 2.8m Piso 1-2-3-4.	2.33	kN/m <sup>2</sup>	Calculado
2	Muros de cubierta (Mampostería bloque de arcilla, espesor 15cm pañetado ambas caras) Altura 1.5m.	1.21	kN/m <sup>2</sup>	Calculado
3	Impermeabilización de cubierta.	0.25	kN/m <sup>2</sup>	Tabla B 3.4.1-4
4				Tabla B 3.4.1-1

	Cielo Raso (Entramado metálico suspendido en yeso).	0.50	kN/m <sup>2</sup>	
5	Baldosa cerámica (20mm Sobre 25mm de mortero).	1.10	kN/m <sup>2</sup>	Tabla B 3.4.1-3
6	Ventana, vidrio, entramado y marco.	0.45	kN/m <sup>2</sup>	Tabla B 3.4.2-5
Total, piso 1-2-3-4		4.38	kN/m <sup>2</sup>	Calculado
Suma N0. (1+4+5+6)				
Total, peso cubierta		2.56	kN/m <sup>2</sup>	Calculado
Suma N0. (2+3+5)				

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta el cálculo de los elementos estructurales teniendo en cuenta la dimensiones de los elementos y densidad del concreto. carga muerta que actúa en la estructura (Ver tabla 10).

**Tabla 10.**

*Cálculo del peso de elementos estructurales, de acuerdo con las dimensiones definidas.*

Elementos estructurales		
Elemento	Carga	Unidad
Losa (e=5cm)	1.18	kN/m <sup>2</sup>
Vigas horizontales (A-B-C-D) (45X50)	5.30	kN/m
Vigas verticales (4-3-2-1) (45X50)	5.30	kN/m
viguetas verticales (12x40)	1.13	kN/m
Columnas (50x55)	6.48	kN/m

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta el cálculo de los pesos totales de los elementos estructurales que conforman la edificación (Ver tabla 11).

**Tabla 11.**

*Cálculo del peso de elementos estructurales y no estructurales en unidades de kN.*

<b>PESO DE ELEMENTOS DE LA EDIFICACION (KN)</b>			
Descripción	Operación	Resultado	Unidad
Peso Total cubierta	(2.56 kNm <sup>2</sup> ) (182.6 m <sup>2</sup> )	467.8	kN
Peso de entrepiso (piso 1-2-3-4)	(4.38 kNm <sup>2</sup> ) (182.6 m <sup>2</sup> )	800.2	kN
Peso losa	(1.18 kNm <sup>2</sup> ) (182.6 m <sup>2</sup> )	215.1	kN
Peso Vigas horizontal (L=16.8m) (#4)	(0.45 x 0.50-0.05 x 16.6)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x4	322.2	kN
Peso Vigas verticales (L=11.35m) (#4)	(0.45 x 0.50-0.05 x 11.0)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x4	216.6	kN
Peso de viguetas verticales (L=11.35m)(#18)	(0.12 x 0.40-0.05 x 11.0)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x18	202.2	kN
Peso de viguetas verticales (L=6.40m)(#2)	(0.12 x 0.40-0.05 x 6.40)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x2	12.7	kN
Peso de viguetas verticales (L=1.40m)(#2)	(0.12 x 0.40-0.05 x 1.40)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x2	2.8	kN
Peso de viguetas Horizontal (L=16.8m)(#1)	(0.12 x 0.40-0.05 x 16.6)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x1	16.7	kN
Peso columnas (L=2.875m) (#9)	(0.50 x 0.55 x 2.875)m x (23.5kN/m <sup>3</sup> ) x16	298.1	kN

**Nota. Fuente:** Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta valores de peso por cada piso y peso total de la estructura

(Ver tabla 12).

**Tabla 12.**

*Cálculo del peso por cada piso de la edificación, se incluye elementos estructurales y no estructurales.*

<b>Peso por piso</b>		
Peso piso 1	2087	kN
Peso piso 2	2087	kN
Peso piso 3	2087	kN
Peso piso 4	2087	kN
Peso piso 5	1754	kN
Peso total del edificio	10100	kN

**Nota. Fuente:** elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

#### **6.4 Análisis por el método Fuerza Horizontal Equivalente, FHE**

Usando el método de la FHE, se calcula una fuerza lateral que actúa sobre la

edificación que sería equivalente a la fuerza producida por un sismo en la base de la estructura. El método consiste en calcular el cortante basal, posteriormente este cortante se reparte en cada uno de los pisos de la edificación como cargas puntuales en los nodos de un pórtico. En la **Tabla 13** se muestran datos de entrada para el análisis del método por FHE.

**Tabla 13.**

*Datos de entrada requeridos para el análisis por fuerza horizontal equivalente FHE.*

<b>Datos de entrada.</b>	
Lugar	Santa Marta
Tipo de suelo	C
Uso	Residencial
F'c	28 MPa
Zona de amenaza	Intermedia
Grado de disipación	DMO

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presentan los pesos de cada piso y la altura de entrepiso correspondiente (Ver tabla 14).

**Tabla 14.**

*Datos de pesos por cada piso y alturas de entrepiso, FHE.*

<b>Estructura de concreto reforzado 5 pisos</b>		
N°	Peso(kN)	Altura por piso(m)
Piso 1	2087	2.875
piso 2	2087	2.875
piso 3	2087	2.875
Piso 4	2087	2.875
Piso 5	1754	2.875
Total	10100	14.375

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta los parámetros sísmicos utilizados para el desarrollo del método por FHE de acuerdo con los criterios de la NSR, 10 (Ver tabla 15).

**Tabla 15.**

*Parámetros sísmicos para el análisis por FHE, datos obtenidos empleando criterios de la NSR-10 título A.*

Parámetros sísmicos		NSR-10
Aa	0.15	Tabla A 2.3-2
Av	0.1	Tabla A 2.3-2
Fa	1.2	Figura A 2.4-1
Fv	1.7	Figura A 2.4-2
I	1	A.2.5.1.4

*Nota.* Tomado de *Fuente:* NSR, (2010), título A.

**6.4.1 Cálculo de TC y TL.** Para el cálculo de TC y TL (Ver ecuación 7 y 8) citamos la Figura #12 Tomada de la NSR-10 título A descrita en el marco teórico y que representa el espectro de aceleración, donde:

$$\bullet \quad Tc = 0.48 \frac{Av.Fv}{Aa.Fa} \quad \text{(Ecuación. 7)}$$

$$\bullet \quad TL = 2.4Fv \quad \text{(Ecuación. 8)}$$

A continuación, en la tabla 16 se muestran los resultados del cálculo del TC y TL empleando las ecuaciones 7 y 8 tomadas de la NSR, (2010)

**Tabla 16.**

*Cálculo de límites de zona de periodos cortos Tc y periodos largos TL.*

Valore de TC(s) y TL(s)	
TC(s)	0.453
TL(s)	4.080

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

#### **6.4.2 Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía R.**

A Continuación, según parámetros de la NSR (2010), Título A. Se describe el cálculo R.

(Ver tabla 17).

**Tabla 17.**

*Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía R.*

Representación	Valor	Descripción	Chequeo NSR-10
----------------	-------	-------------	----------------



$\Phi_a$	1	Coeficiente de reducción por irregularidad en altura	Tabla A.3-7 / Figura A.3-2
$\Phi_p$	1	Coeficiente de reducción por irregularidad en planta	Tabla A.3-6 / Figura A.3-1
$\Phi_r$	1	Coeficiente de reducción por Ausencia de redundancia	Inciso A.3.3-8
$R_0$	5	Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico	Tabla A.3-3
$R = \Phi_a \times \Phi_p \times \Phi_r \times R_0$	5	Coeficiente de capacidad de disipación de energía R	Calculado

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**6.4.3 Espectro de aceleración  $S_a$ .** A continuación, se muestra una tabla y un gráfico que representa el espectro de aceleración sin reducir y reducido para una edificación residencial de 5 niveles ubicada en la ciudad de santa marta (Ver tabla 18, Ver figura 38).

**Tabla 18.**

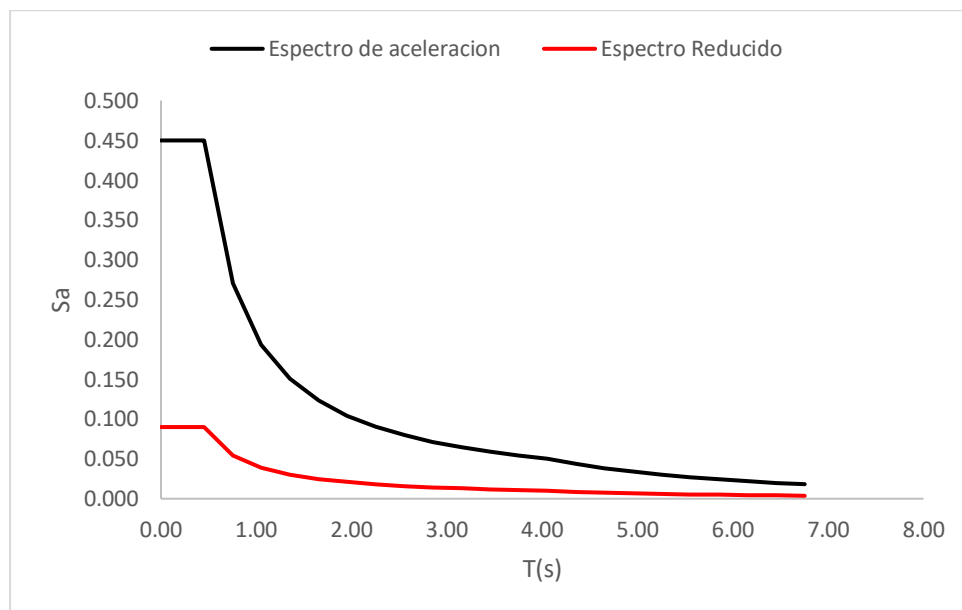
*Cálculo del espectro de aceleración horizontal, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad para un periodo dado.*

T(s)	$S_a$	$S_a/R$	Modelo
0.00	0.450	0.090	$S_a = 2.5AaFaI$
0.45	0.450	0.09	
0.75	0.271	0.054	
1.05	0.194	0.039	
1.35	0.151	0.030	
1.65	0.123	0.025	
1.95	0.104	0.021	$S_a = 1.2.Av.Fv.I$
2.25	0.091	0.018	T
2.55	0.080	0.016	
2.85	0.071	0.014	
3.15	0.065	0.013	
3.45	0.059	0.012	
3.75	0.054	0.011	
4.05	0.050	0.010	
4.35	0.044	0.009	
4.65	0.038	0.008	
4.95	0.034	0.007	

5.25	0.030	0.006	Sa= $\frac{1.2 \cdot Av \cdot Fv \cdot TL \cdot I}{T^2}$
5.55	0.027	0.005	
5.85	0.024	0.005	
6.15	0.022	0.004	
6.45	0.020	0.004	
6.753	0.018	0.004	

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, en la **figura 38** se muestra el espectro de aceleración de diseño y el espectro reducido empleado para el análisis de derivas de la edificación.



**Figura 38.** Espectro de aceleración edificación en estudio. *Fuente:* Elaboración propia., Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**6.4.4 Periodo de la estructura.** El periodo de la estructura es calculado teniendo en cuenta parámetros de la NSR-10 para un pórtico resistente a momento de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y no están adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a fuerzas sísmicas. Para el cálculo del periodo de la estructura se utiliza la **Ecuación 4** Ubicada en el marco teórico. En lo siguiente se muestra el resumen de cálculo del periodo natural de la estructura (Ver tabla 19).

$$T_{\alpha} = c_t h^{\alpha} \quad \text{(Ecuación. 4) Tomado de la NSR-10}$$

**Tabla 19.**

*Resultado cálculo de Periodo natural de la estructura.*

Periodo de la estructura Ta		NSR-10
Ct	0.047	Tabla A.4.2-1
Alpha	0.900	Tabla A.4.2-1
h	14.375	Calculado
Ta	<b>0.518</b>	Calculado

*Nota.* Cálculo de Ta. *Fuente:* NSR-10 título A.

**6.4.5 Cálculo del valor de Sa.** Conociendo el valor del periodo natural de la estructura Ta, podemos saber que dicho periodo se ubica en la zona de periodos intermedios para lo cual el valor de Sa es calculado con la siguiente expresión (Ver ecuación 9) . En la **tabla 20** se muestra resumen del cálculo de Sa,

$$S_a = \frac{1,2 \cdot A_a \cdot F_v \cdot I}{T} \quad \text{(Ecuación. 9)}$$

**Tabla 20.**

*Valor del espectro de aceleración, expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad.*

Valor espectro de aceleración.		Modelo
Sa Sin reducir	0.394	Sa= $\frac{1.2 \cdot A_v \cdot F_v \cdot I}{T}$
Sa Reducido	0.08	Sa= $\frac{\text{Sa sin reducir}}{R}$

*Nota.* Cálculo de Sa y Sa reducido *Fuente:* NSR, (2010), título A.

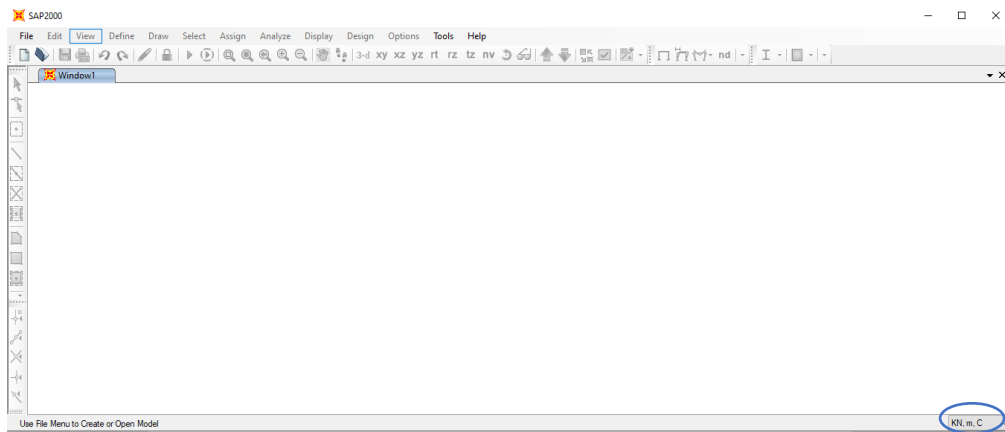
**NOTA:** Para esta investigación no se realizó análisis dinámico espectral, el sismo solo se evaluó aplicando el método de fuerza horizontal equivalente FHE.

## 6.5 Modelación, SAP 2000

A continuación, se presenta el procedimiento para realizar la modelación del sistema estructural aporticado de 5 niveles en el software de análisis y diseño SAP 2000 20, algunos

criterios considerados en el programa se definen de acuerdo con la normativa colombiana NSR-10.

**6.5.1 Ventana principal SAP 2000 20.** A continuación, en la figura 39 se muestra la ventana principal del programa al abrirlo muestra las barras de funciones y comandos que posee. Lo primero que se define son las unidades de medidas para trabajar, como se puede chequear en la parte inferior derecha seleccionamos kN, m, C.



**Figura 39.** Ventana principal del software. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000 20

**6.5.2 Creación de plantilla.** Para la creación de la plantilla en la cual realiza el modelo se selecciona la opción «**File**» luego «**New Model**» y seleccionamos «**Grid Only**». A continuación, en la figura 40 se muestran las medidas de la plantilla por espaciamiento teniendo en cuenta las medidas de la planta estructural antes definida.

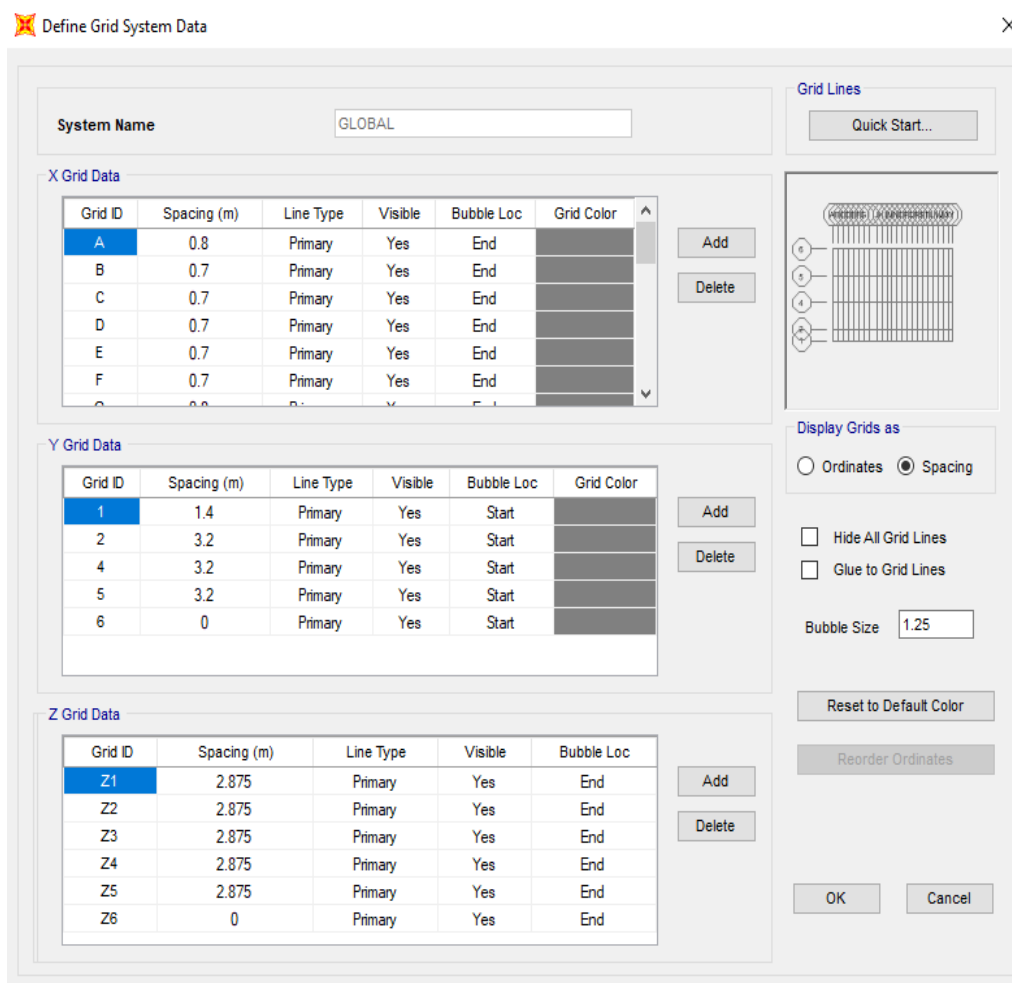


Figura 40. Creación de plantilla. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.3 Definición de materiales.** Se define las características del material en este caso el concreto, para lo cual seleccionamos «**Define**» luego «**Materials**» y posterior «**Add New Materials**». Se selecciona concreto y se define aspectos como: Nombre, Densidad, Modulo de elasticidad, relación de Poisson, Resistencia a la compresión  $f'c$ . En la figura 41 se muestra los datos insertados en el software

Figura 41. Definición de materiales. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.4 Definición de secciones de elementos.** Para definir las secciones de elementos tipo vigas y columnas se selecciona «**Define**» luego «**Sector Properties**» y posterior «**Frame Sections**». A continuación, en la figura 42 se muestra las secciones definidas en el programa para el modelo.

Figura 42. Definición de secciones vigas y columnas. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

Para definir las secciones de elementos de área (losa) se selecciona «**Define**» luego «**Section Properties**» y posterior «**Area Sections**». A continuación, en la figura 43 se muestra las secciones definidas en el programa para el modelo.

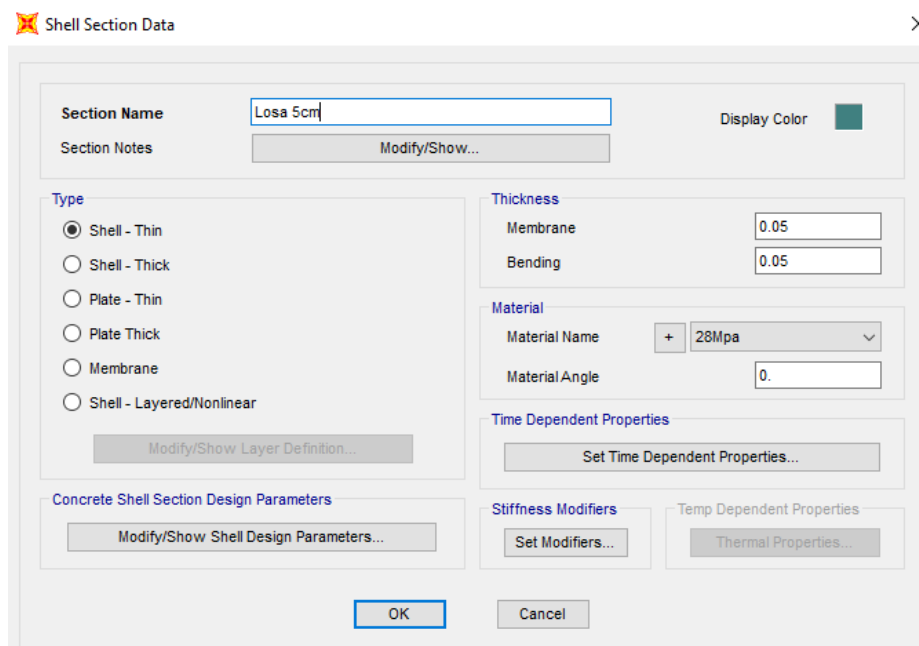


Figura 43. Definición de secciones losa. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.5 Definición de tipos de cargas.** Para definir los tipos de cargas se selecciona «Define» luego «Load Patterns» y posterior se agregan los diferentes tipos de solicitaciones que actúan en la estructura, (Ver figura 44).

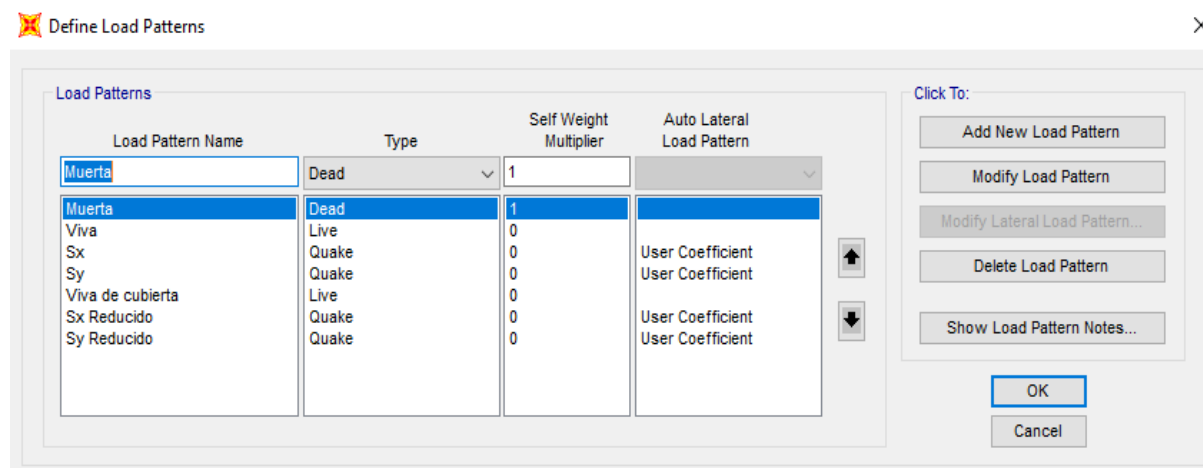
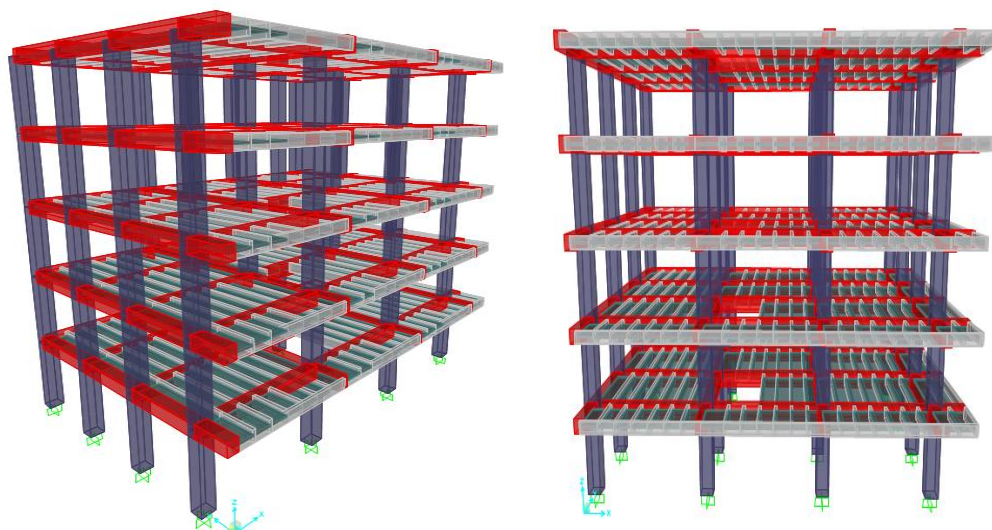
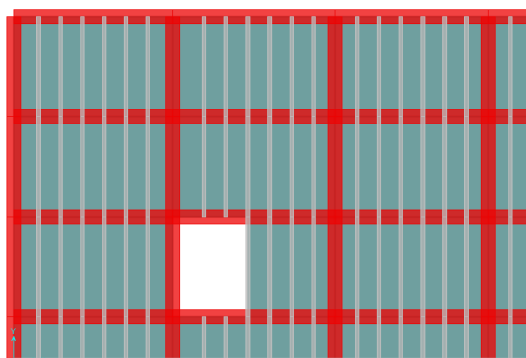


Figura 44. Definición de cargas. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

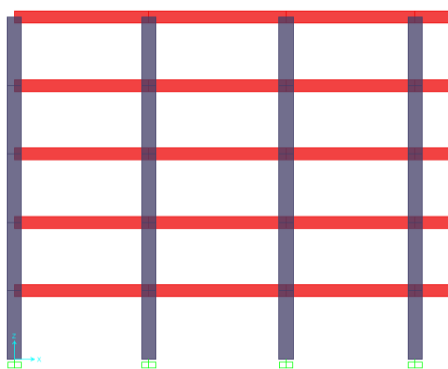
**6.5.6 Dibujo del modelo sobre la plantilla inicialmente creada.** A continuación, en las figuras 45, 46 y 47 se presentan diferentes vistas del modelado de la estructura en SAP 2000 20.



**Figura 45.** Vistas en 3D de la estructura. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000 20.



**Figura 46.** Vista en planta de la estructura. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000 20.



**Figura 47.** Vista en perfil XZ. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.7 Asignación de restricciones en apoyo de columnas.** Para definir las restricciones se selecciona «**Assing**» luego «**Joint**» y posterior «**Restraints**». A continuación, en la figura 48 se muestra el tipo de restricción aplicada en los apoyos de las columnas del modelo, corresponden a empotramientos.



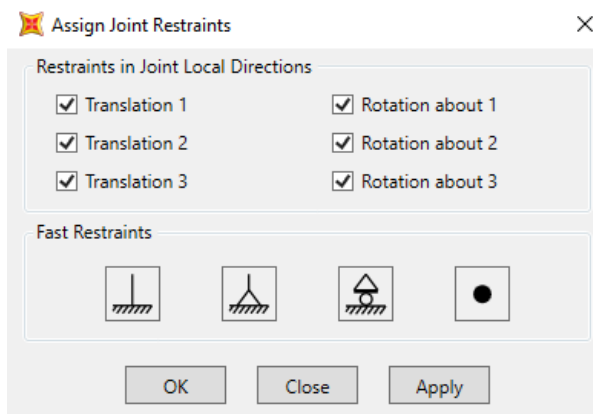


Figura 48. Asignación de restricciones. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.8 Asignación de diafragma rígido.** Se realiza la asignación de un diafragma rígido por cada nivel de la estructura, se selecciona «**Assing**» luego «**Joint**» y posterior «**Constraints**». A continuación, en la figura 49 se muestra cómo queda registrado cada uno de los diafragmas asignados.

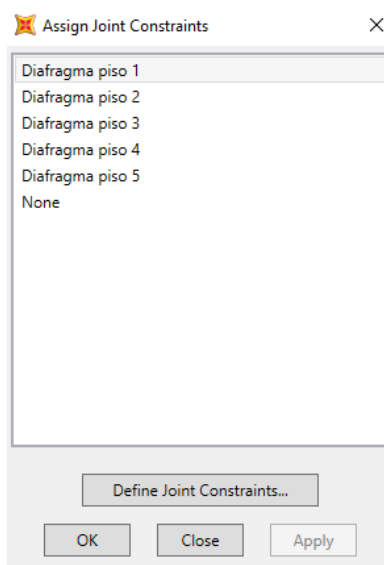
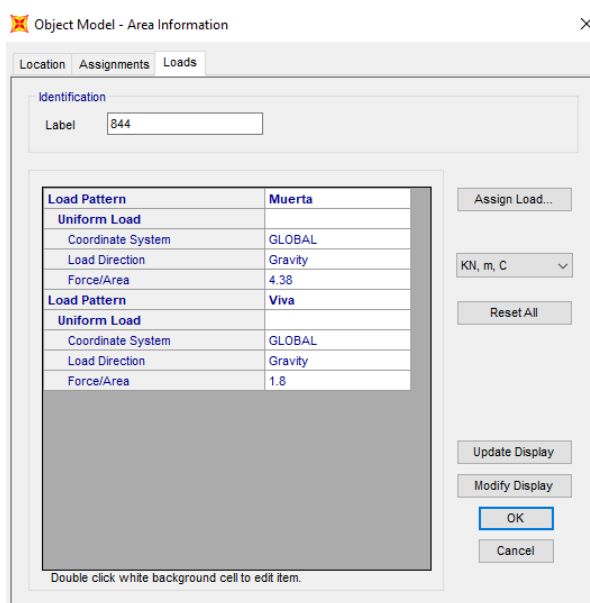


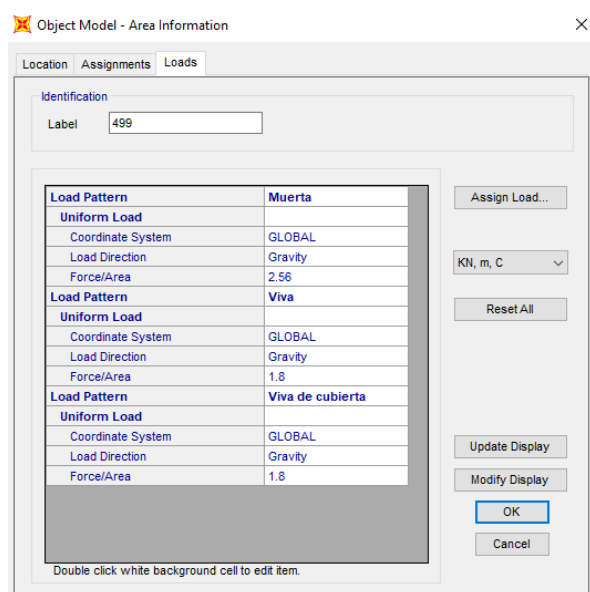
Figura 49. Asignación de diafragma rígido. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**6.5.9 Asignación de cargas en secciones de área (kN/m<sup>2</sup>).** Para la asignación de las cargas se debe inicialmente seleccionar la sección de área a cargar, luego seleccionar «**Assing**», posteriormente «**Area Load**», «**Uniform (Shell)**», se agrega el valor que se desea asignar para esa sección. A continuación, en las figuras 50 y 51 se presentan la forma como quedan asignadas las cargas para cada piso. La **Carga Muerta** se obtiene como se indica en

la tabla 9, la **Carga Viva** se obtiene de tabla B.4.2.1-1 de la NSR-10 y la Carga Viva de Cubierta se obtiene de tabla B.4.2.1-2 de la NSR-10.



**Figura 50.** Asignación de cargas piso1-2-3 y 4. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000 20.



**Figura 51.** Asignación de cargas piso 5. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000 20.

## 6.6 Chequeo de derivas.

Las derivas son desplazamientos laterales que puede experimentar la una estructura por las sollicitaciones, en este caso las cargas de sismo son las que producen el mayor porcentaje de desplazamiento.

La deriva total ocurre cuanto se desplaza la estructura después del evento sísmico, pero, para el análisis se debe considerar los desplazamientos relativos de piso. La NSR-10 en A.6.4.1 y la tabla A.6.4-1 establece que la deriva de piso no puede superar el 1% para estructuras de concreto reforzado (Ver tabla 21).

### Tabla 21.

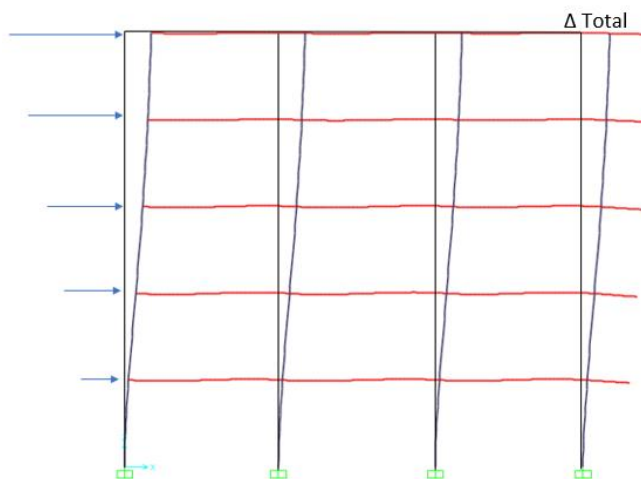
*Chequeo de derivas, deriva máxima según NSR-10.*

**Tabla A.6.4-1**  
Derivas máximas como porcentaje de  $h_{pi}$

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1.0% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.010 h_{pi}$ )
de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0.5% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.005 h_{pi}$ )

**Nota.** Deriva máxima de piso No debe ser mayor al 1% **Fuente:** Tomado de NSR, (2010), Título A.

La figura 52 ilustra el comportamiento (Deformación) que sufre un pórtico al ser afectado por fuerzas de sismo por piso. Donde  $\Delta$  es la deriva total de piso.



**Figura 52.** Ilustración de un pórtico deformado por acción de fuerzas laterales. **Fuente.** Elaboración propia.

**NOTA:** Recordamos que en el análisis por fuerza horizontal equivalente FHE se calcula el valor del espectro  $S_a$  y  $S_a$  reducido, para el análisis de derivas se usa el valor de  $S_a$  sin reducir.

**6.6.1 Combinaciones de cargas para el análisis de derivas.** A continuación, se presentan las combinaciones de cargas usadas para el análisis de derivas, teniendo en cuenta el título B de la NSR-10

1.4D (Ecuación. 10)

1.2D + 1.6L (Ecuación. 11)

1.2D + 1.6L + 0.5Lr (Ecuación. 12)

1.2D + 1Sx + 1L (Ecuación. 13)

1.2D + 1Sy + 1L (Ecuación. 14)

0.9D + 1Sx (Ecuación. 15)

0.9D + 1Sy (Ecuación. 16)

- **Tipos Cargas,** A continuación, se presentan los valores de las cargas aplicadas a la estructura.

Muerta Cubierta D (2.56kN/m<sup>2</sup>) (Ver Tabla 9.)

Muerta Entrepiso D(4.38kN/m<sup>2</sup>) (Ver Tabla 9.)

Viva L (1.8kN/m<sup>2</sup>) (Tabla B4.2.1-1 de la NSR-10)

Viva de cubierta Lr (1.8kN/m<sup>2</sup>) (Tabla B4.2.1-1 de la NSR-10)

Sismo Sa=0.394 (Ver tabla 20).

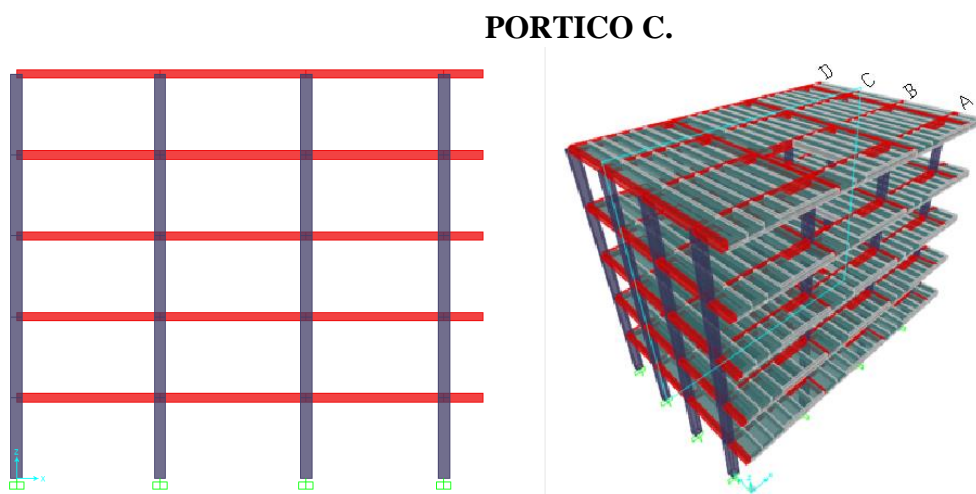
Inicialmente en el predimensionamiento se define secciones de los elementos estructurales, a continuación se presenta el chequeo de comprobación para dichos elementos y verificando si cumple o no con los requisitos de derivas descritos en la NSR.10.

**6.6.2 Chequeo de derivas, secciones de Predimensionamiento.** Recordamos que, las secciones definidas en el predimensionamiento son:

- Vigas 25x30cm
- Viguetas 12x30cm

- Columnas 30x40cm
- Losa 5cm

A continuacion, en la figura 53 se muestra el **portico C** utilizado para el analisis de derivas con la combinacion de cargas  $1.2D+1Sx+1L$ . Dicho portico con la cobinacion de carga mencionada es donde se presenta la sitacion mas critica en cuento a desplazamientos horizontales.



**Figura 53.** Pórtico seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas en Predimensionamiento. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000 20.

A continuacion, en la figura 54 se muestran los desplazamientos totales por cada piso para un sismo que actua en direccion X, Se observa que el desplazamiento de techo estaria dado en 38.3cm lo cual es un valor relativamnte alto considerando las dimensines de elementos estructurales empleadas en el analisis.

ξ

**Modelo estructural creado para el chequeo de derivas (pórtico C), con la combinación  $1.2D+1Sx+1L$  (Situación más crítica).**

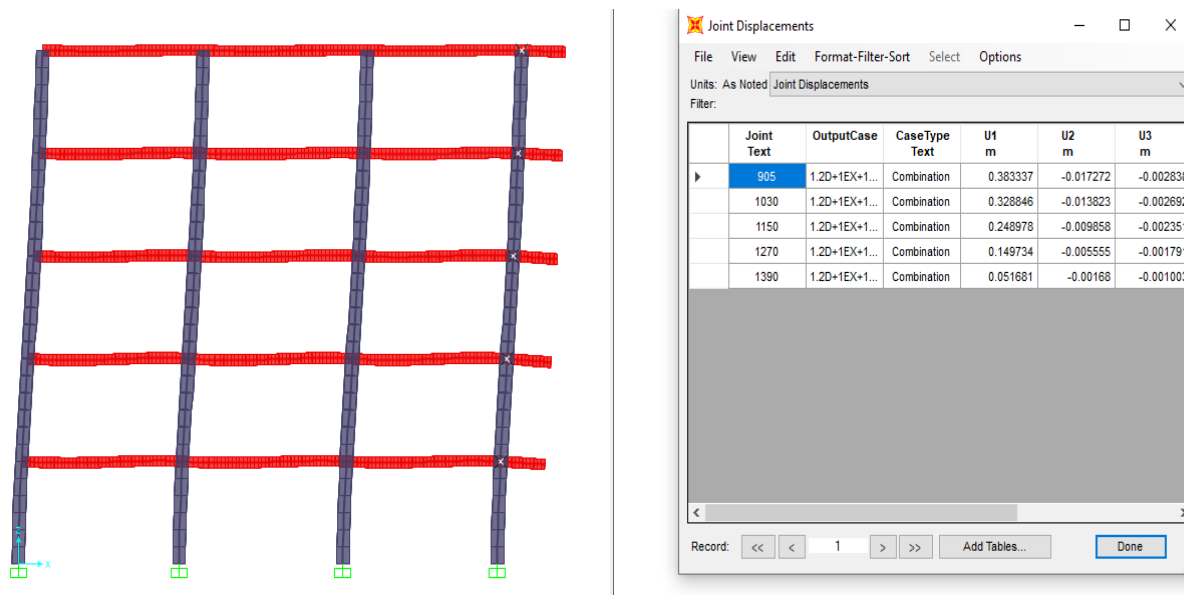


Figura 54. Derivas totales para el pórtico C. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

▪ **Análisis de derivas.** En lo siguiente, se puede apreciar que, debido a las dimensiones que nos arroja el Predimensionamiento de los elementos, **No se cumple** con las derivas máxima que la NSR-10 estipula. Por lo cual se hace necesario trabajar con secciones más grandes (Ver tabla 22).

Tabla 22.

Análisis de derivas secciones Predimensionadas (1.2D+1Sx+1L).

Deriva de piso								
Piso	X(m)	Y(m)	Δ X(m)	Δ Y(m)	Deriva	h piso (m)	α piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.05168	-0.00168	0.05168	-0.00168	0.05171	2.875	1.80%	No Cumple
Piso 2	0.14973	-0.00556	0.09805	-0.00388	0.09813	2.875	3.41%	No Cumple
Piso 3	0.24898	-0.00986	0.09924	-0.00430	0.09934	2.875	3.46%	No Cumple
Piso 4	0.32885	-0.01382	0.07987	-0.00397	0.07997	2.875	2.78%	No Cumple
Piso 5	0.38334	-0.01727	0.05449	-0.00345	0.05460	2.875	1.90%	No Cumple

Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

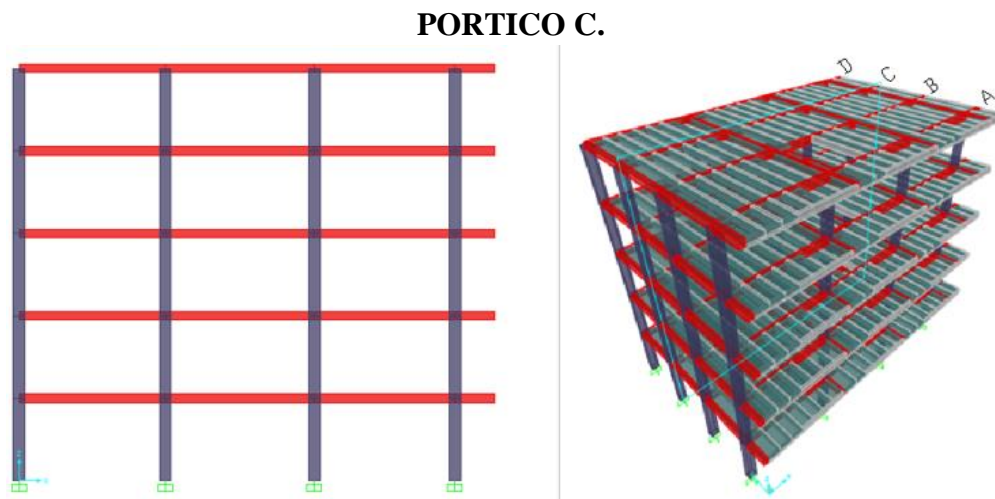
**6.6.3 Chequeo de derivas, nuevas secciones.** Comprobando que las dimensiones de elementos estructurales dadas por Predimensionamiento no cumplen con los requisitos de derivas estipulados por la NSR-10, Se procede a realizar un nuevo análisis aumentando

secciones, NO se estipula cambios en materiales como: Modulo de elasticidad, resistencia, densidad.

Recordamos que, las nuevas secciones definidas anteriormente son:

- Vigas 45x50cm
- Viguetas 12x40cm
- Columnas 50x55cm
- Losa 5cm

A continuacion, en la figura 55 se muestra el analisis de derivas del **portico C** para la combinacion de cargas  $1.2D+1Sx+1L$ (Situacion mas critica).



**Figura 55.** Pórtico seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000 20.

A continuación, en la figura 56 se muestran los desplazamientos horizontales obtenidos en SAP 2000 20 para el chequeo de derivas con las dimensiones dadas de los elementos estructurales (pórtico C), con la combinación  $1.2D+1Sx+1L$ .

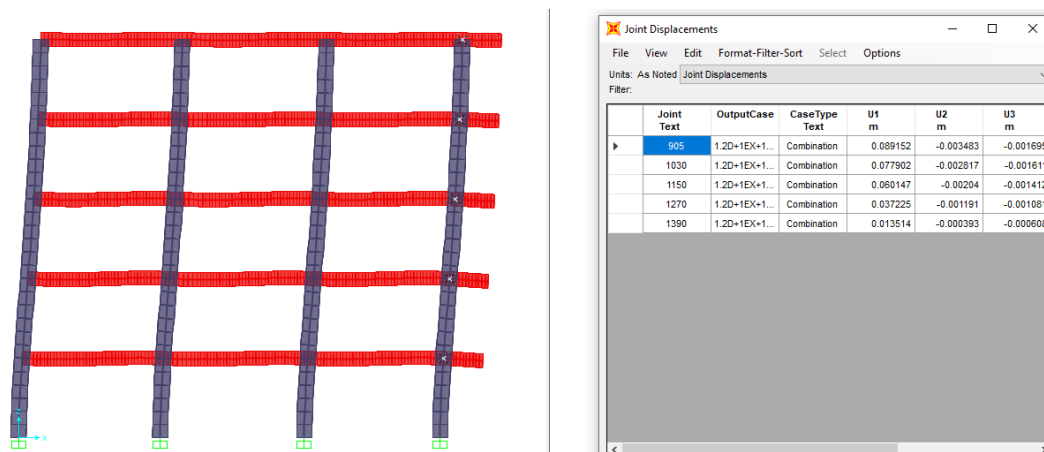


Figura 56. Derivas totales para el pórtico C. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

En la **tabla 23** se presenta el análisis de derivas para la combinación dada, se puede observar que, se cumple con los requisitos de la NSR-10 pero, aún es necesario realizar el chequeo con demás combinaciones de cargas y diferentes elementos.

**Tabla 23.**

*Análisis de derivas Secciones de dadas (1.2D+1Sx+1L).*

Deriva de piso								
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.01351	-0.00039	0.01351	-0.00039	0.01352	2.875	0.47%	Si cumple
Piso 2	0.03723	-0.00119	0.02371	-0.00080	0.02372	2.875	0.83%	Si cumple
Piso 3	0.06015	-0.00204	0.02292	-0.00085	0.02294	2.875	0.80%	Si cumple
Piso 4	0.07790	-0.00282	0.01776	-0.00078	0.01777	2.875	0.62%	Si cumple
Piso 5	0.08915	-0.00348	0.01125	-0.00067	0.01127	2.875	0.39%	Si cumple

Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**NOTA.** En **anexos C**. podemos encontrar todo el análisis de derivas de la edificación, incluyendo todos los pórticos y todas las combinaciones de cargas posibles de acuerdo con la NSR-10.

## 6.7 Diseño de los elementos estructurales.

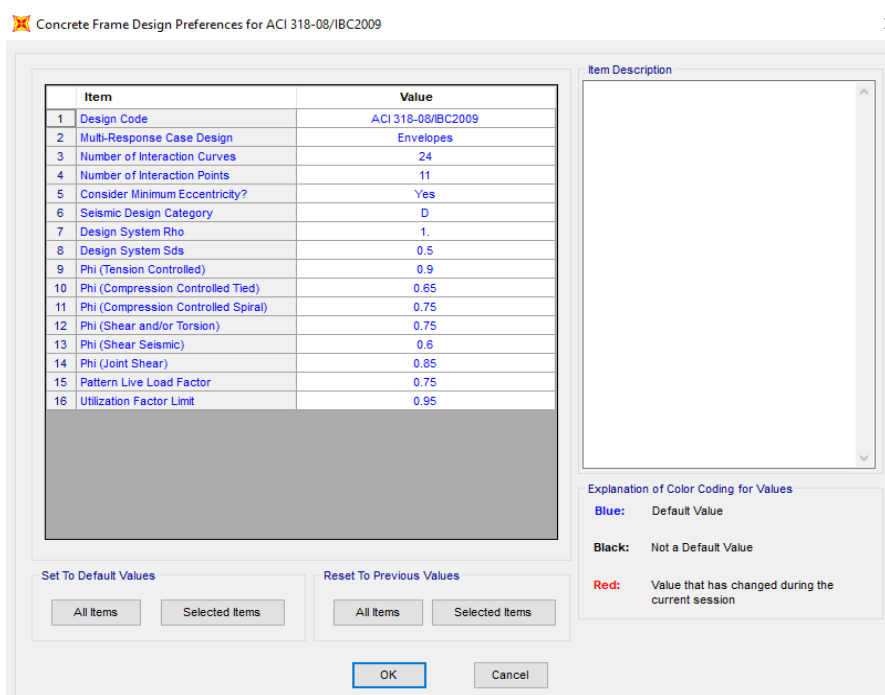
Cumpliendo con los requisitos de análisis de derivas de acuerdo con los parámetros de la NSR-10, se puede iniciar con la fase de diseño de los elementos estructurales, la etapa de diseño es presentada en SAP 2000 20 y luego es verificada con cálculos teóricos aplicando



criterios de la NSR-10. A continuación, se describe el procedimiento de diseño en SAP 2000 20.

Inicialmente seleccionamos «Desing» en la barra principal de opciones, luego «Concrete Frame Desing», posterior «View Revise Preferences», a continuación, se muestran los parámetros usados para el diseño.

El código de diseño empleado es la ACI 318-08 es la normativa en la cual está basada la norma colombiana NSR-10. La categoría de diseño sísmico es tipo D, la cual representa a la zona de amenaza sísmica intermedia en el recuadro también se define los diferentes factores de seguridad phi usados en diseños de acuerdo con la NSR-10. En la figura 57 se observan los parámetros de diseños utilizados.



**Figura 57.** Parámetros de diseño para estructura de concreto reforzado. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000.

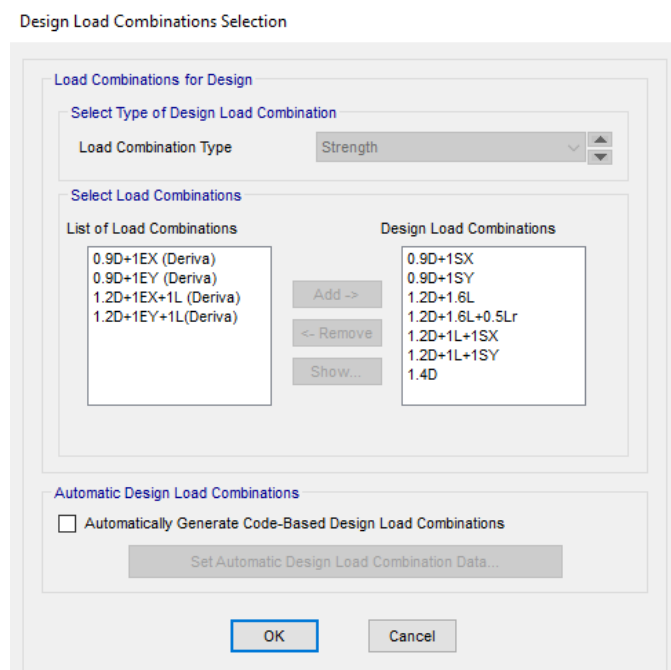
**6.7.1 Combinaciones de cargas para el diseño.** Las combinaciones de cargas empleadas son descritas en el título B de la NSR.10. A continuación, se presenta el procedimiento para la asignación de combinaciones de cargas para el diseño de la estructura en SAP 2000.

Inicialmente seleccionamos «Desing» en la barra principal de opciones, luego «Concrete Frame Desing», posterior «Select Desing Combos», a continuación, se muestran las combinaciones de cargas empleadas.

Como se observa en la **figura 58**, hay 2 listas de combinaciones, en la parte izquierda están las combinaciones de cargas usadas para el análisis de derivas las cuales no fueron incluidas en la lista de la parte derecha (Combinaciones de diseño), debido a que, la fuerza sísmica para el diseño debe ser afectada por el coeficiente de capacidad de disipación de energía R.

$$F = \frac{F \text{ sin reducir}}{R}$$

(Ecuación. 17)



**Figura 58.** Combinaciones de carga para diseño estructural. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000.

**6.7.2 Ejecución del diseño.** A continuación, se muestra la ejecución de diseño de la estructura en SAP 2000 20 y posterior la comprobación y verificación del diseño de forma manual. En la figura 59 se aprecia el pórtico una vez ejecutado el diseño (lado izquierdo), los valores en color gris nos indica que los elementos están cumpliendo las solicitaciones aplicadas.

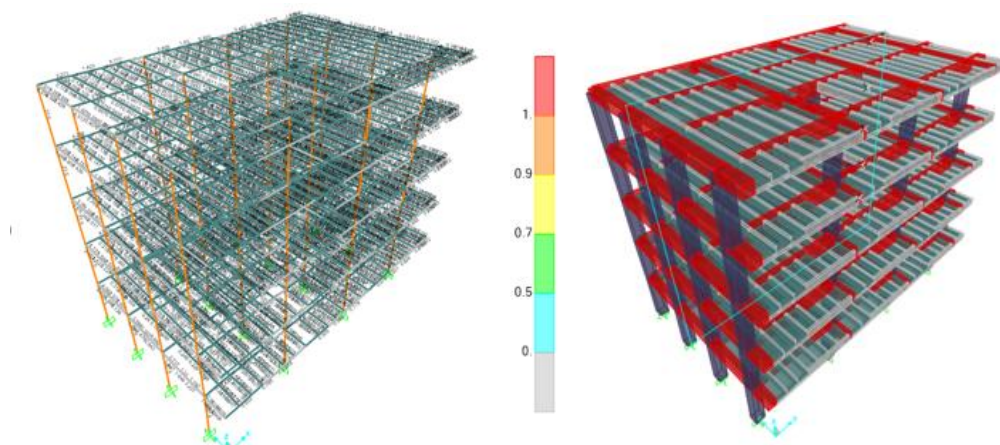


Figura 59. Diseño estructural ejecutado. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000.

**6.7.3 Diseño a flexión para verificación del buen funcionamiento del SAP 2000, Pórtico C.** A continuación, en la figura 60 presentamos los diagramas de momentos y resultados del diseño a flexión del pórtico C, luego se elige una viga la cual se encuentra seleccionada en la imagen, dicha viga es diseñada de forma manual para comprobar el correcto funcionamiento del Software, el Momento de diseño a flexión de la viga es 152.31kN-m para una combinación de carga 1.2D+1L+1Sx.

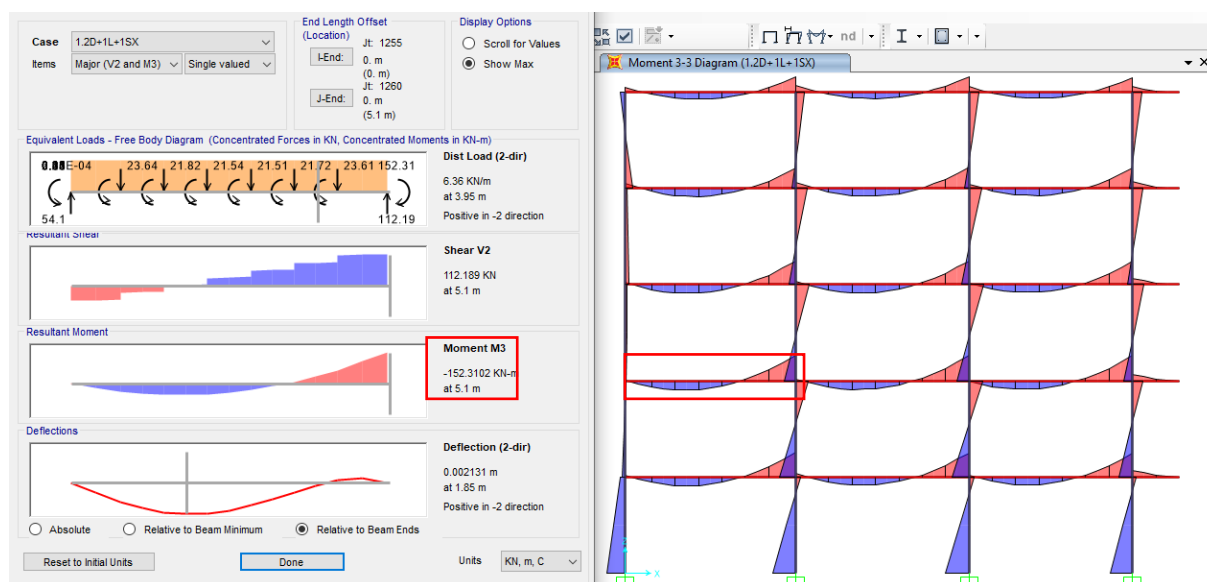


Figura 60. Diagramas de momento para pórtico C. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000.

A continuación, En la figura 61 y 62 se muestra los resultados del diseño a flexión del pórtico C, los valores que indican en cada elemento corresponden al área de refuerzo que requiere cada uno ‘As’’. Una viga del piso 2 esta seleccionada, dicha viga es usada para comprobar el correcto diseño ejecutado por el programa, realizando el diseño de forma manual y comparando resultados.

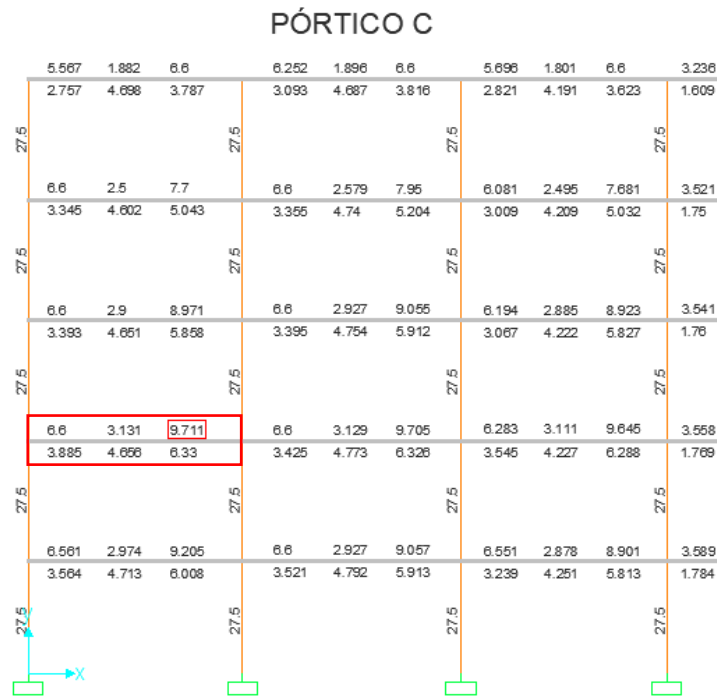


Figura 61. Diseño pórtico C. Fuente: Elaboración propia en SAP 2000 20.

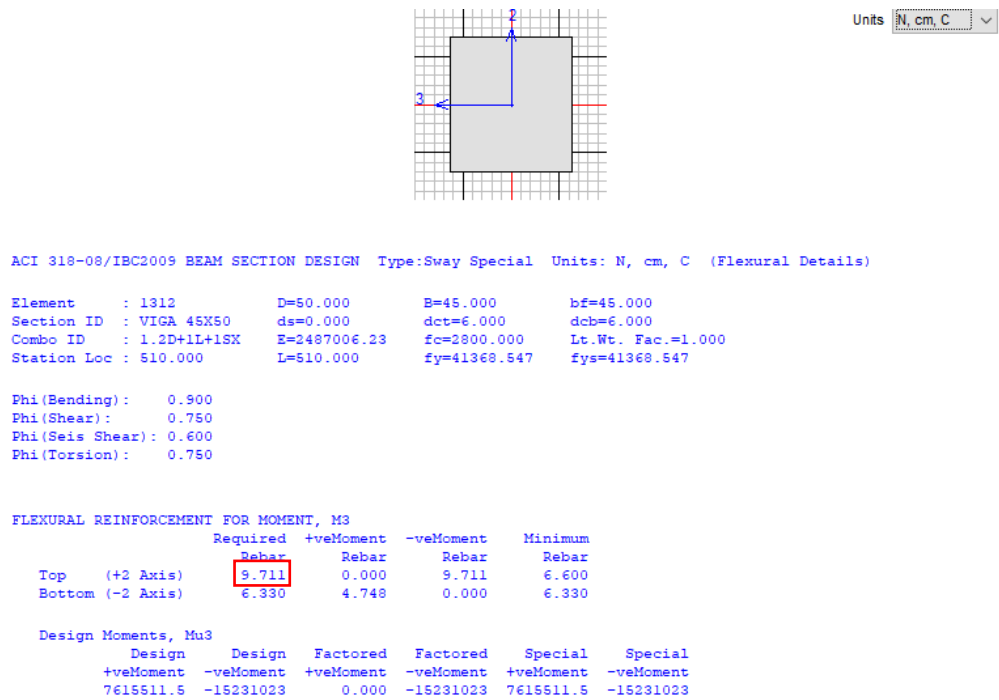


Figura 62. Resultados del diseño a flexión de la viga seleccionada, pórtico C. Elaboración propia en SAP 2000 20.

▪ **Paso a paso de diseño a flexión para la viga seleccionada.** A continuación, en la **tabla 24** se muestran los datos de entrada necesarios para realizar el diseño a flexión de forma manual de la viga seleccionada.

**Tabla 24.**

*Datos de entrada para ejecutar el modelo en SAP 2000.*

Datos de entrada		
Mu	152.31	kN.m
fc	28	MPa
fy	420	MPa
h	0.5	m
b	0.45	m
Phi	0.9	
β1	0.85	

**Nota. Fuente:** Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

- **Comprobación de la longitud libre entre apoyos  $L_n \leq 50b$ .**

$$L_n = 5.2m \quad L_n \leq 50b$$

$$50b = 22.5m \quad 5.2m \leq 22.5m \text{ ----- ok}$$

- **Comprobación de viga de gran altura  $L_n > 4h$**

$$L_n = 5.2 \quad L_n > 4h$$

$$4h = 2 \quad 5.2m > 2m \text{ ----- ok}$$

- **Cálculo del  $d$  supuesto.**

$$r = 0.06 m \quad d \text{ supuesto} = h - r$$

$$h = 0.5 m \quad d = 0.44 m$$

- **Cálculo de  $R_n$**

$$R_n = \frac{Mu}{\phi b d^2} \quad (\text{Ecuación. 18}) \quad R_n = 1942.53 \text{ kPa}$$

$$R_n = \frac{152.31 \text{ kN.m}}{0.9 * 0.45 m * (0.44m)^2}$$

- **Cálculo de la cuantía de diseño.**

$$\rho \text{ diseño} = \frac{0.85 f'c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'c}} \right) \quad (\text{Ecuación. 19})$$

$$\rho \text{ diseño} = \frac{0.85 * 28 \text{ MPa}}{420 \text{ MPa}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 1942.53 \text{ kPa}}{0.85 * 28000 \text{ kPa}}} \right)$$

$$\rho \text{ diseño} = 0.004831$$

- **Chequeo de cuantía.**

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4f_y} \quad (\text{Ecuación. 20}) \quad \rho_{min} = \frac{\sqrt{28 \text{ MPa}}}{4 * 420 \text{ MPa}}$$

$$\rho_{min} = 0.00315$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y}$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{420 \text{ MPa}}$$

$$\rho_{min} = 0.00333$$

**Nota:** Se toma el mayor valor entre las cuantías calculadas ( $\rho_{min} = 0.00333$ ).

$$\rho_{bal} = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} * \frac{600}{600+f_y} \text{ (Ecuación. 21)}$$

$$\rho_{bal} = \frac{0.85 * 28 \text{ MPa} * 0.85}{420 \text{ MPa}} * \frac{600}{600 + 420 \text{ MPa}}$$

$$\rho_{bal} = 0.02833$$

$$\rho_{max} = 0.63 \rho_{bal} \text{ (Ecuación. 22)}$$

$$\rho_{max} = 0.01785$$

$$\rho_{min} < \rho_{diseño} < \rho_{max}$$

$$0.003333 < 0.004831 < 0.01785$$

$$\rho_{diseño} = 0.004831$$

- *Cálculo de As*

$$As = \rho b d \quad \text{(Ecuación. 23)}$$

$$As = 0.004831 * 45 \text{ cm} * 44 \text{ cm}$$

$$As \text{ calculado de forma manual } As = 9.60 \text{ cm}^2$$

$$As \text{ calculado en SAP 2000 } As = 9.71 \text{ cm}^2$$

- *Cálculo del número de barras.*

$$As \text{ 7/8"} = 3.870 \text{ cm}^2$$

$$As \text{ 5/8"} = 1.979 \text{ cm}^2$$

$$2 \text{ #7 ----- } 7.74 \text{ cm}^2$$

$$2 \text{ #5 ----- } 3.959 \text{ cm}^2$$

As ----- 11.7 cm<sup>2</sup>

▪ *Cálculo del d real.*

$$d \text{ real} = h - r - d \text{ estribo} - \frac{d \text{ varillas}}{2} \quad (\text{Ecuación. 24})$$

$$d \text{ real} = 50 \text{ cm} - (4 \text{ cm} + 0.95 + \left( \frac{1.5875 + 2.222}{2} \right))$$

$$d \text{ real} = 44.1 \text{ cm}$$

▪ *Cálculo de cuantía real.*

$$\rho = \frac{As}{bd} \quad (\text{Ecuación. 25}) \quad \rho = 0.00589$$

$$\rho = \frac{11.7 \text{ cm}^2}{45 \text{ cm} * 44.1 \text{ cm}}$$

▪ *Chequeo de cuantía real.*

$$\rho_{min} < \rho \text{ real} < \rho_{max}$$

$$0.003333 < 0.00589 < 0.0178 \text{ ----- Ok}$$

▪ *Chequeo de estribo.*

$$4db > d \quad 3.81 > 1.905 \text{ ---ok}$$

4db (estribo)  $\geq$  d de la barra longitudinal (esfuerzo).

▪ *Chequear diseño  $\phi Mn > Mu$*

$$a = \frac{AsFy}{0.85f'cb} \quad (\text{Ecuación. 26})$$

$$a = \frac{0.00117 \text{ m}^2 * 420 \text{ MPa}}{0.85 * 28 \text{ MPa} * 0.45 \text{ m}}$$

$$a = 0.04588 \text{ m} \quad Mn = AsFy \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (\text{Ecuación. 27})$$

$$Mn = 0.00117 \text{ m}^2 * 420 \text{ mPa} \left( 0.441 \text{ m} - \frac{0.04588}{2} \right) * 1000$$



$$Mn = 205.71 \text{ kN.m} \quad \phi Mn = 185 \text{ kN.m}$$

$$\phi Mn > Mu$$

$$185 \text{ kN.m} > 152.3 \text{ kN.m} \text{ ----- Ok}$$

**Resumen:** Se podría decir que, el programa SAP 2000 20 está realizando de forma correcta los cálculos, al comparar los valores de cuantía son muy cercanos, también se comprueba que la viga cumple con requisitos de resistencia.

As calculado de forma manual=9.60cm<sup>2</sup>

As calculado en SAP 2000 20=9.71cm<sup>2</sup>

Se comprueba que el software está ejecutando correctamente los diseños.

#### 6.7.4 Diseño a Cortante para verificación del buen funcionamiento del SAP

**2000, Pórtico C.** A continuación, en la figura 63 presentamos los diagramas de Cortantes del pórtico C, luego se elige una viga la cual se encuentra seleccionada en la imagen, dicha viga es diseñada por cortante de forma manual para comprobar el correcto funcionamiento del Software, el diagrama muestra cortantes máximo de 112.18 KN para la viga seleccionada utilizando la combinación de cargas 1.2D+1L+1Sx.

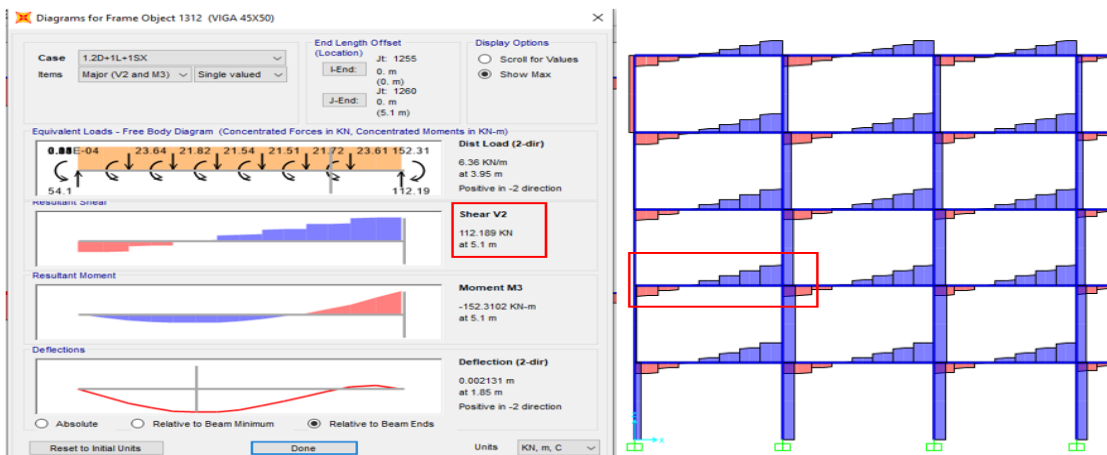
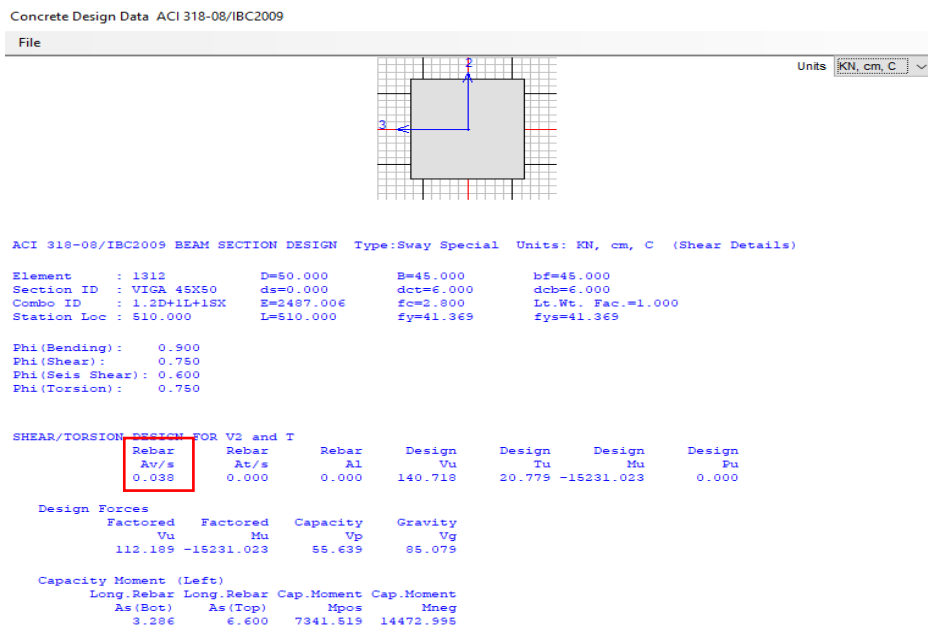


Figura 63. Diagramas de cortante para pórtico C. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000.

A continuación, En la figura 64 se muestra los resultados del diseño a cortante de la viga seleccionada, dicha viga es usada para comprobar el correcto diseño ejecutado por el programa, realizando el diseño de forma manual y comparando resultados. El resultado calculado en SAP 2000 20 arroja un valor de  $A_v/S=0.038\text{cm}^2/\text{cm}$ .



**Figura 64.** Resultados del diseño a flexión de la viga seleccionada, pórtico C. Elaboración propia en SAP 2000 20.

A continuación, se muestra el procedimiento de diseño a cortante para la viga seleccionada de forma manual, al final se comparan los resultados obtenidos con el fin de comprobar que el programa está realizando de forma correcta el diseño. **La tabla 25** muestra los datos de entrada necesarios para realizar el diseño a cortante.

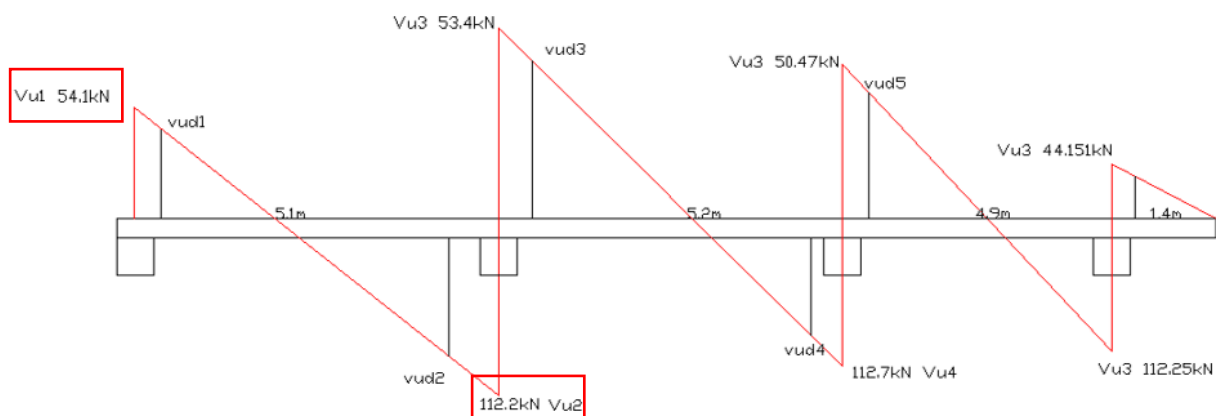
**Tabla 25.**

Datos de entrada para diseño a cortante.

Datos de entrada	
W (kN/m)	6.36
f <sub>c</sub> (MPa)	28
f <sub>y</sub> (MPa)	420
h (m)	0.5
b (m)	0.45
d (m)	0.442
d' (m)	0.050
φ <sub>b</sub> (m)	0.0175
R (m)	0.04
Φ#3 (m)	0.0095
b. Col (m)	0.5
A. #3(cm <sup>2</sup> )	0.71

**Nota. Fuente:** Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

Inicialmente se debe hallar Vu<sub>1</sub> y Vu<sub>2</sub> mediante el diagrama de cortante del elemento en estudio. La figura 65 muestra el diagrama de cortante de la viga seleccionada.



**Figura 65.** Diagrama de cortante de viga 45x50. **Fuente:** elaboración propia.

Una vez definido Vu<sub>1</sub>= 54.1 kN y Vu<sub>2</sub>= 112.2 kN. Como siguiente paso se determina el valor de X para hallar los cortantes en Vud<sub>1</sub> y Vud<sub>2</sub>, de la siguiente forma:

$$X = \frac{b_{col}}{2} + d$$

$d$ = distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide de la fila extrema de acero longitudinal en tracción  
 $d=h-d'$

$$d' = r + \phi e + \frac{\phi b}{2}$$

Suponiendo el diámetro promedio de las barras #5 y #6  $\phi b = 0.0175m$  se calcula el valor de  $d'$  de la siguiente forma

$$d' = 0.04m + 0.0095m + \frac{0.0175m}{2}$$

$$d' = 5.82cm$$

Luego se procede a calcular el valor de “ $d$ ” como se muestra a continuación.

$$d=50cm-5.80cm=44.2cm$$

una vez se obtiene  $d$ , se calcula el valor de  $X$ .

$$X = \frac{0.5 cm}{2} + 0.442 cm$$

$$X = 0.692 m$$

Luego de calcular el valor de  $X$ , se hallan los valores del cortante máximo  $Vud1$  y  $Vud2$ .

$$Vud = Vu - (W * X)$$

$$Vud1 = 54.1 kN - (6.36 kN * 0.692 m)$$

$$Vud1 = 49.70 kN$$

$$Vud2 = 112.2 kN - (6.36 kN * 0.692 m)$$

$$Vud2 = 107.80 kN$$

Para el cálculo de la resistencia al cortante del concreto  $\phi Vc$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$Vc = 0.17 \lambda \sqrt{f'c} bwd \quad \lambda = 1 \text{ concreto de peso normal}$$

$$Vc = 0.17 * 1 * \sqrt{28 mpa} * 0.45 * 0.442 * 1000$$

$$Vc = 178.83 kN$$

$$\phi Vc = 0.75 * Vc$$

$$\phi Vc = 134.12 kN$$

Teniendo en cuenta el valor de la resistencia al cortante del concreto ya calculando, se puede determinar la resistencia del estribo  $\phi V_s$  de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Phi V_s &= V_{ud} - \Phi V_c \\ \Phi V_{s1} &= 49.70 \text{ kN} - 134.12 \text{ kN} \\ \Phi V_{s1} &= -84.42 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi V_{s2} &= 107.80 \text{ kN} - 134.12 \text{ kN} \\ \Phi V_{s1} &= -26.32 \text{ kN}\end{aligned}$$

Luego se multiplica la resistencia al cortante del concreto por un factor de 0.5.

$$\begin{aligned}0.5 * \Phi V_c &= 0.5 * 134.12 \text{ kN} \\ &= 67.06 \text{ kN}\end{aligned}$$

La NSR-10 establece que lo siguiente:

**Sí,  $V_s \leq 0$ , entonces:**

- Si  $V_u \geq 0.5\Phi V_c$

Calcular  $S(\text{Max})=(d/2, 600\text{mm})$  y comparar con lo siguiente:

$$\begin{aligned}\text{Suponer } A_v &(\text{Área de estribo}) \\ A_v \text{ min} &= 0.062\sqrt{f'c} \left( \frac{bw * s}{F_{yt}} \right) \geq 0.35 \left( \frac{bw * s}{F_{yt}} \right)\end{aligned}$$

- Si no.

Si,  $V_s \leq 0.5\Phi V_c$  No se requiere estribos.

$$V_{ud1} 49.70 \text{ kN} < 0.5 * \Phi V_c$$

$$V_{ud2} 107.80 \text{ kN} > 0.5 * \Phi V_c$$

De acuerdo con lo anterior, para  $v_{ud1}$  el elemento no requiere refuerzo a cortante, lo cual no significa que no lleva estribos. Para  $V_{ud2}$  si requiere estribos. Finalmente, se calcula la separación mínima  $A_{vmin}$  de la siguiente manera:

$$\text{Comparar con } S1 = \frac{d}{2} = \frac{0.442}{2} = 0.22\text{m} \quad \text{y } S2 = 60\text{cm}$$

$$A \text{ (cm)}^2 \text{ } 3/8" = 0.713$$

$$Av \text{ min (cm)}^2 \text{ (2 ramales)} = 1.425$$

$$S3 = \frac{Av \text{ min } f'yt}{0.062 \sqrt{f'c} bw}$$

$$S3 \text{ (2 ramales)} = \frac{\frac{1.425 \text{ cm}^2}{100^2} * 420 \text{ mpa}}{0.062 \sqrt{28 \text{ mpa}} * 0.45 \text{ m}}$$

$$S3 \text{ (2 ramales)} = \mathbf{0.405 \text{ m}}$$

$$S4 = \frac{Av \text{ min } f'yt}{0.35 bw}$$

$$S4 \text{ (2 ramales)} = \frac{\frac{1.425 \text{ cm}^2}{100^2} * 420 \text{ mpa}}{0.35 * 0.45 \text{ m}}$$

$$S4 \text{ (2 ramales)} = \mathbf{0.380 \text{ m}}$$

Se escoge el menor valor de "S=38cm" por diseño obtenido para comparar con el resultado en SAP 2000 20

$$\frac{Av}{S} = \frac{1.425 \text{ cm}^2}{38\text{cm}} = 0.038 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$Av/s=0.038 \text{ cm}^2/\text{cm}$ .....Calculo en SAP 2000 20.

$Av/s=0.038 \text{ cm}^2/\text{cm}$ .....Calculo a mano

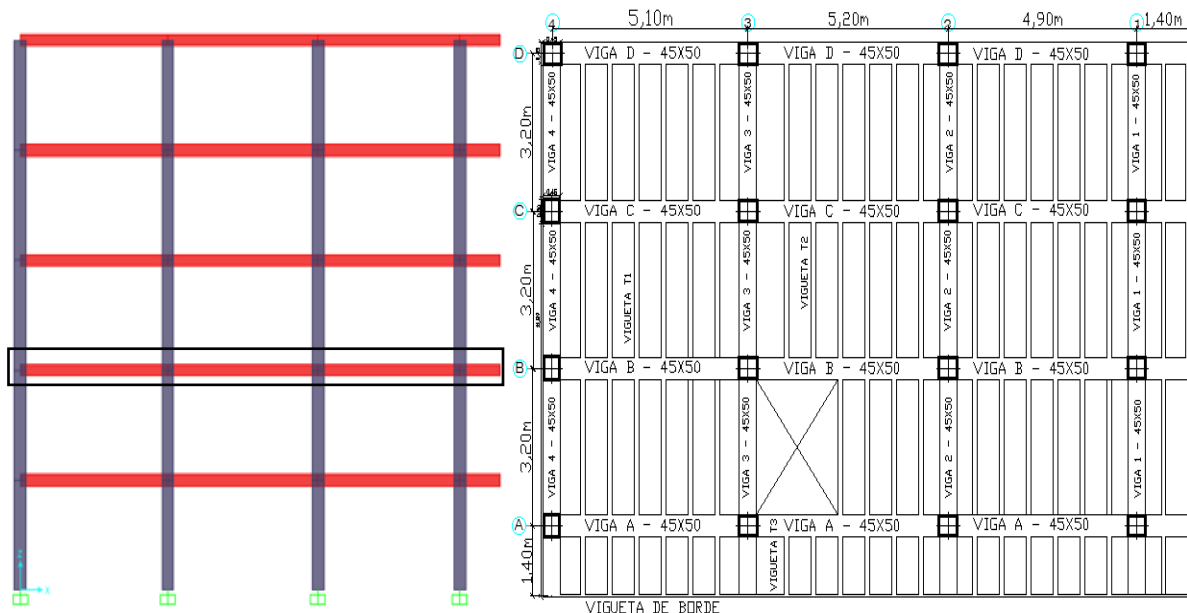
En la figura 64 se observa que el resultado por diseño a cortante para la zona de confinamiento obtenido en SAP 2000 20 de  $Av/S$  es el mismo obtenido en el diseño a mano, pero, se debe tener en cuenta que la NSR-10 establece condiciones por lo tanto la separación máxima permitida de los estribos en la zona de confinamiento  $S = \frac{d}{2} = \frac{44.2}{2} = 22.1\text{cm}$ , por

efectos de seguridad para la edificación se tendrán en cuenta una separación máxima permitida  $S=20\text{cm}$  en algunos elementos.

### 6.7.5 Diseño a flexión, cortante en elementos tipo vigas y columnas. A

continuación, se muestra el resultado de diseños de elementos tipo viga y columnas. Se presenta valores para el diseño a flexión “As” y valores de diseño por esfuerzo cortante “Av/s” los resultados presentados es la condición más crítica, es decir se realiza un análisis de cuáles son los valores mayores obtenidos de “As” y “Av/s” de cada elemento y con esos se procede a realizar los despieces de elemento.

En cuanto a elementos tipo VIGA la condición más crítica es dada en la planta del Nivel 2, es decir, en el piso 2 se obtiene los mayores valores de “As” para vigas y viguetas para una combinación  $1.2D+1S_x+1L$ . En la **figura 66** se muestra el piso seleccionado siendo el más crítico y la planta estructural del mismo para el diseño estructural.



**Figura 66.** Planta estructural, piso 2, condiciones más críticas de elementos tipo viga. **Fuente.** Elaboración propia en SAP 2000 y AutoCAD

**6.7.6 Resumen del diseño estructural en Vigas.** A continuación, en las figuras desde la 67 hasta la figura 78 se presentan los valores de cuantías de acero (diseño a flexión y cortante) para elementos tipo vigas y su respectivo despiece de acero para cada elemento. Diseños de elaboración propia, apoyados en Software SAP 2000 20.

UNIDADES  $A_s$ :  $cm^2$      $A_v/S$ :  $cm^2/cm$

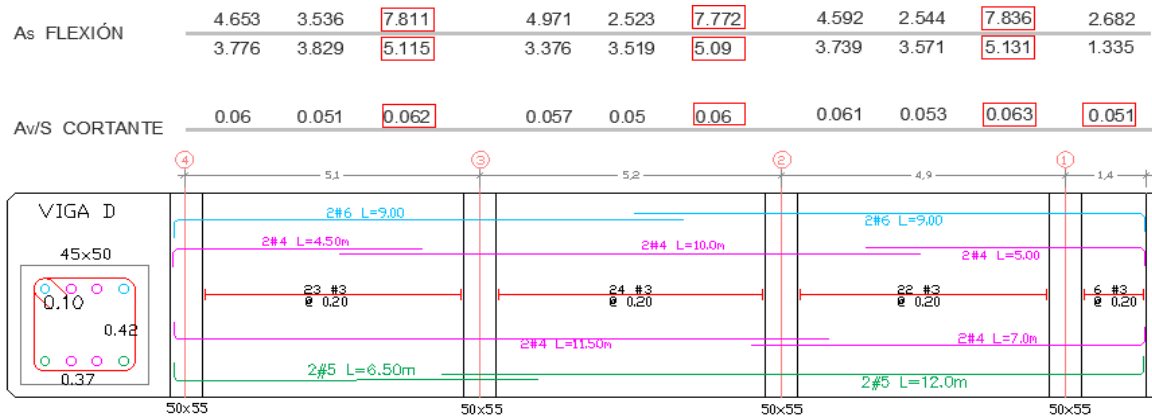


Figura 67. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga D de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

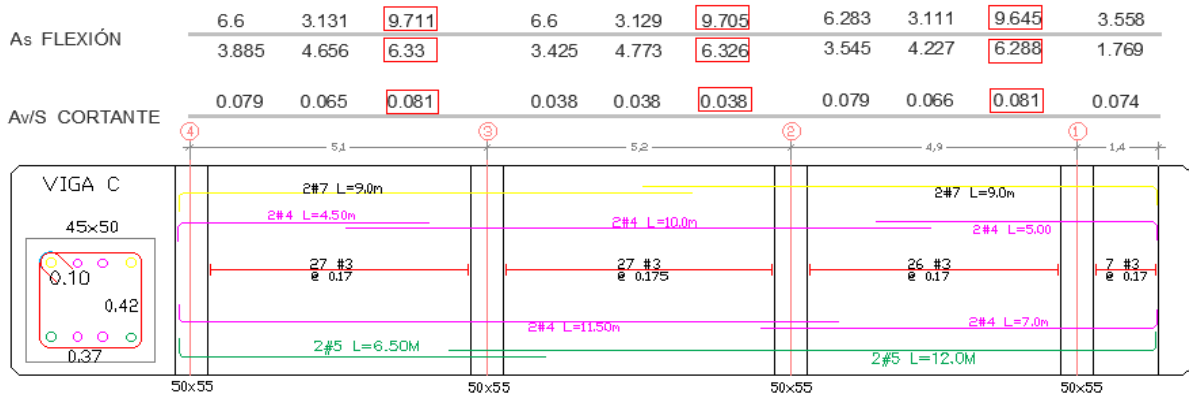


Figura 68. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga C de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.



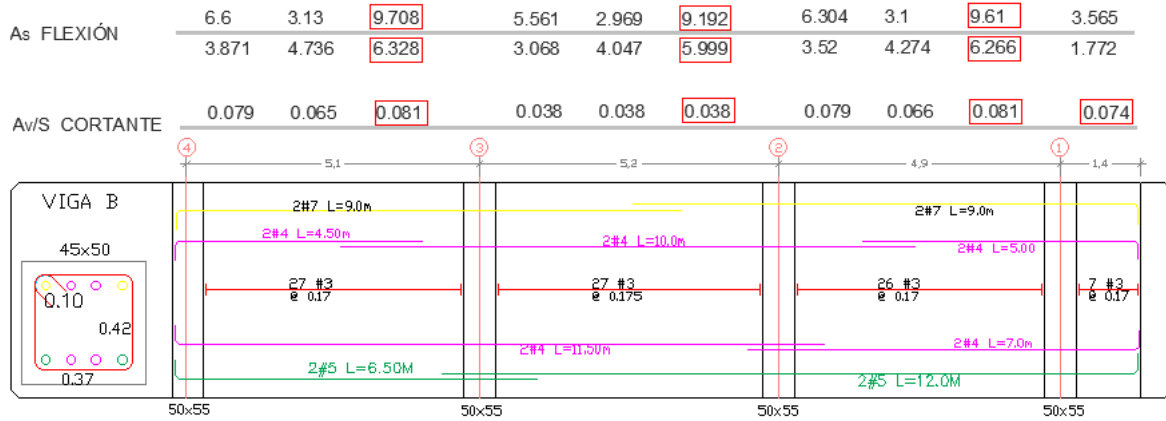


Figura 69. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga B de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

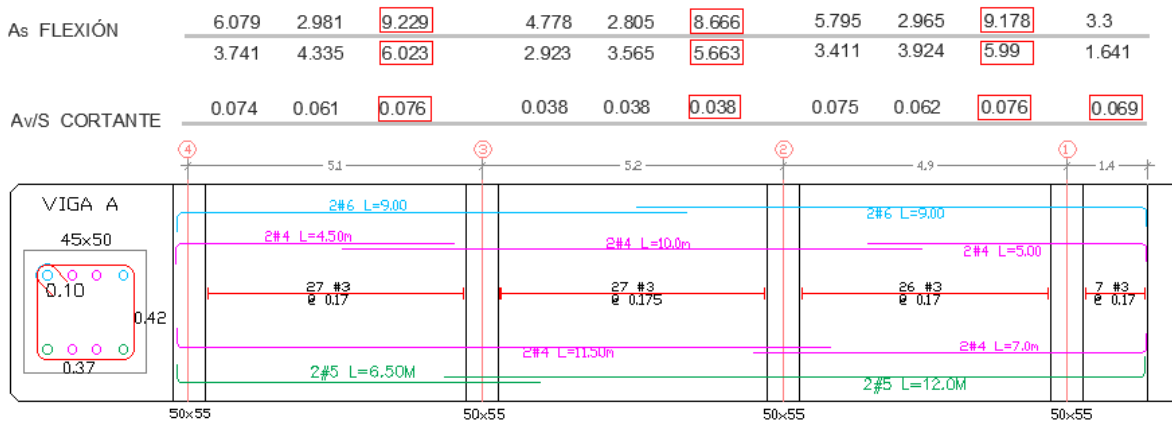


Figura 70. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga A de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

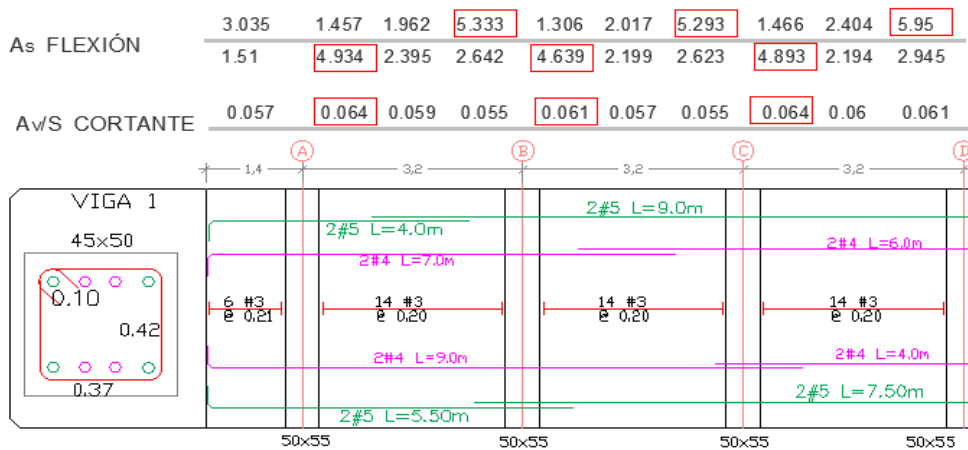


Figura 71. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 1 de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

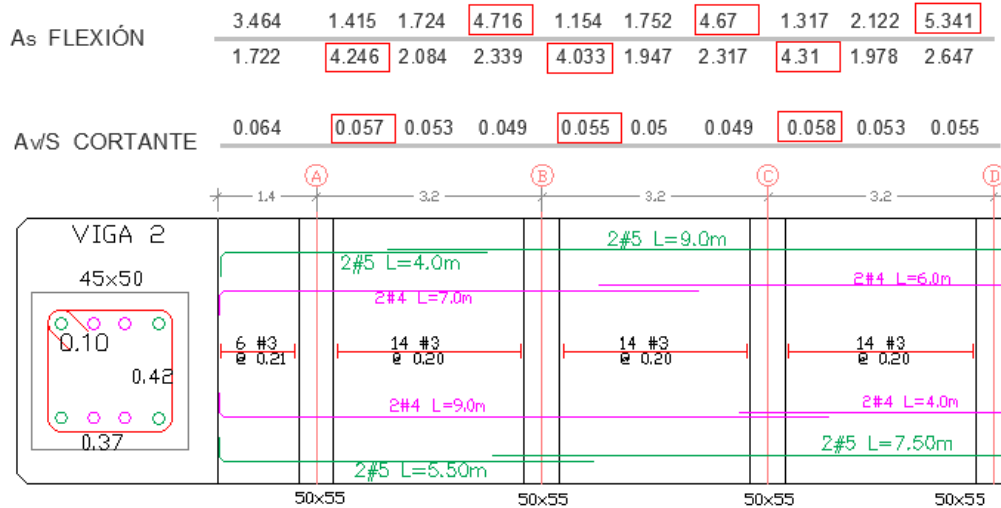


Figura 72. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 2 de la planta estructural.  
Fuente: elaboración propia.

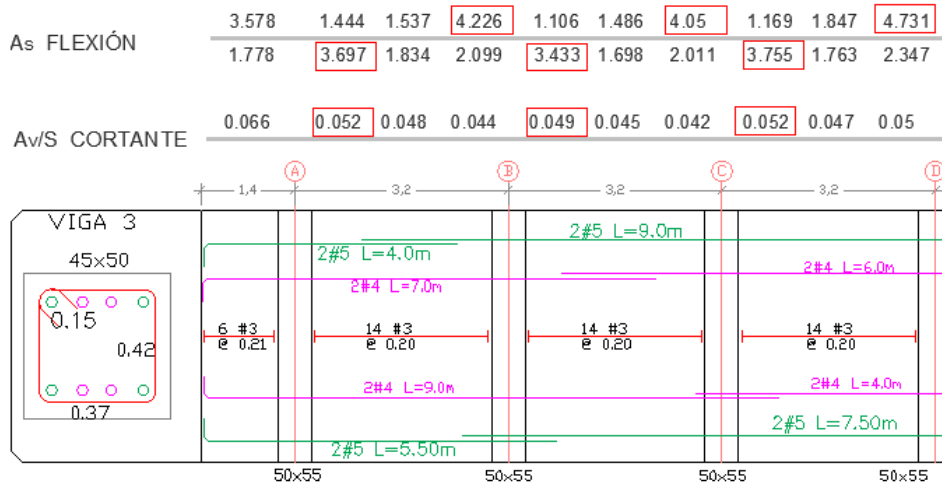


Figura 73. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 3 de la planta estructural.  
Fuente: elaboración propia.

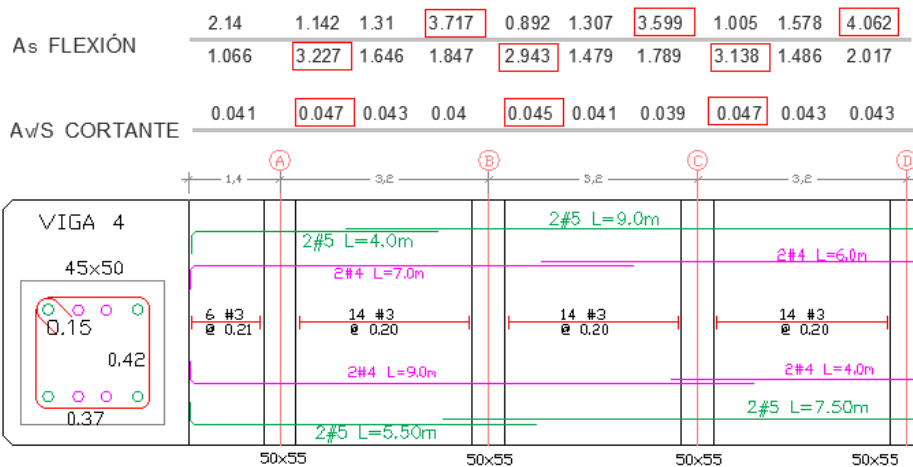


Figura 74. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la viga 4 de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

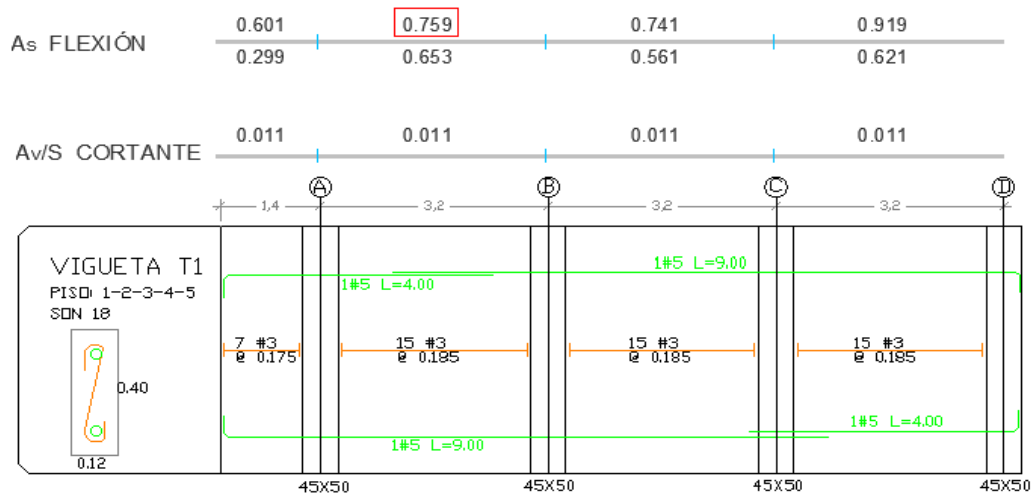


Figura 75. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 1 de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

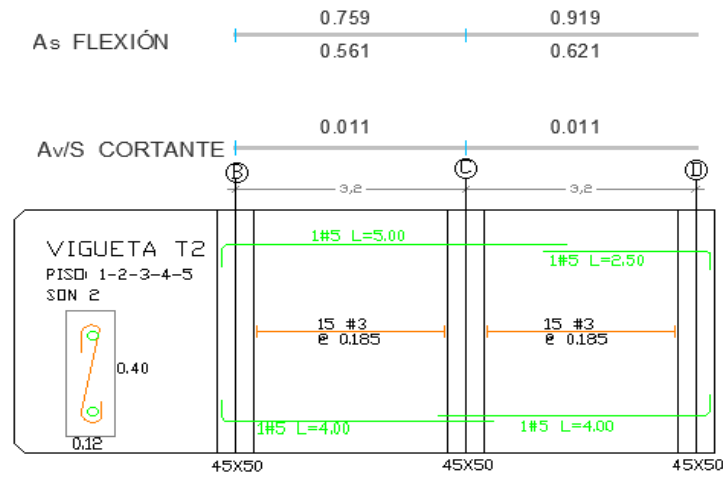


Figura 76. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 2 de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

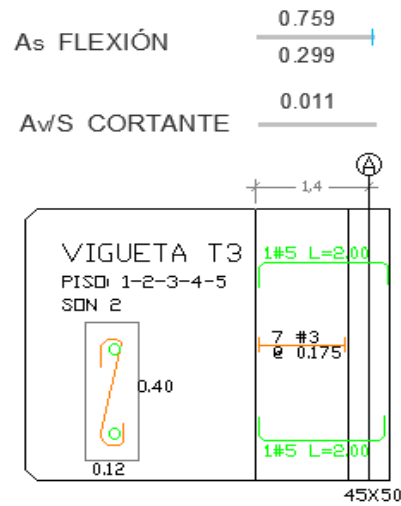


Figura 77. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta tipo 3 de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

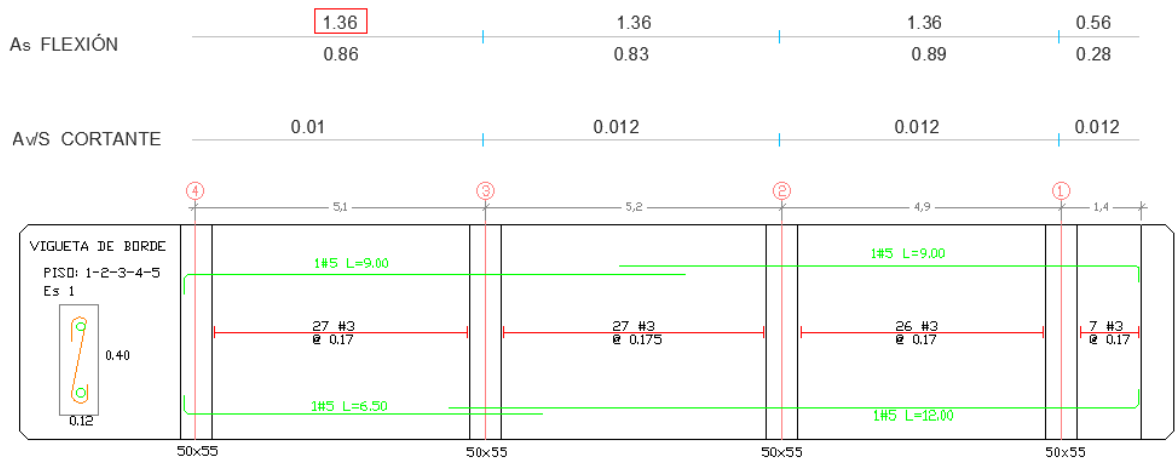


Figura 78. Cuantías obtenidas por esfuerzo a flexión, cortante y despiece de la vigueta de borde de la planta estructural. Fuente: elaboración propia.

**6.7.7 Resumen del diseño estructural de columnas.** A continuación, se presenta el

diseño de columnas considerando los principios de la NSR-10 y la herramienta SAP 2000 20. En la figura 79 se muestra el pórtico C y seleccionada la columna más crítica, de acuerdo con las combinaciones de cargas asignadas y los cálculos realizados en SAP 2000 20.

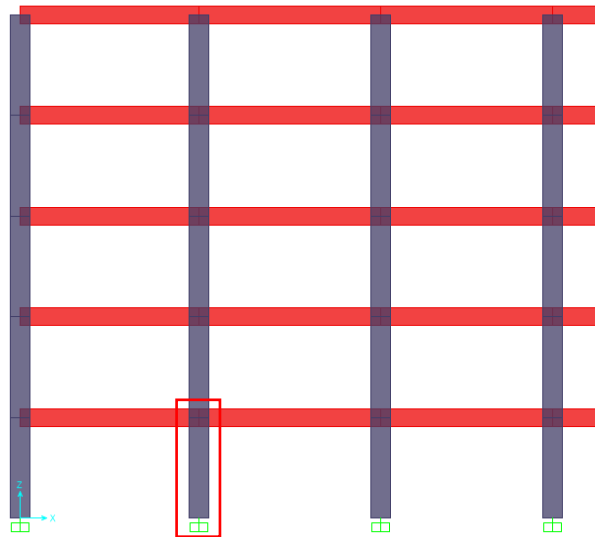
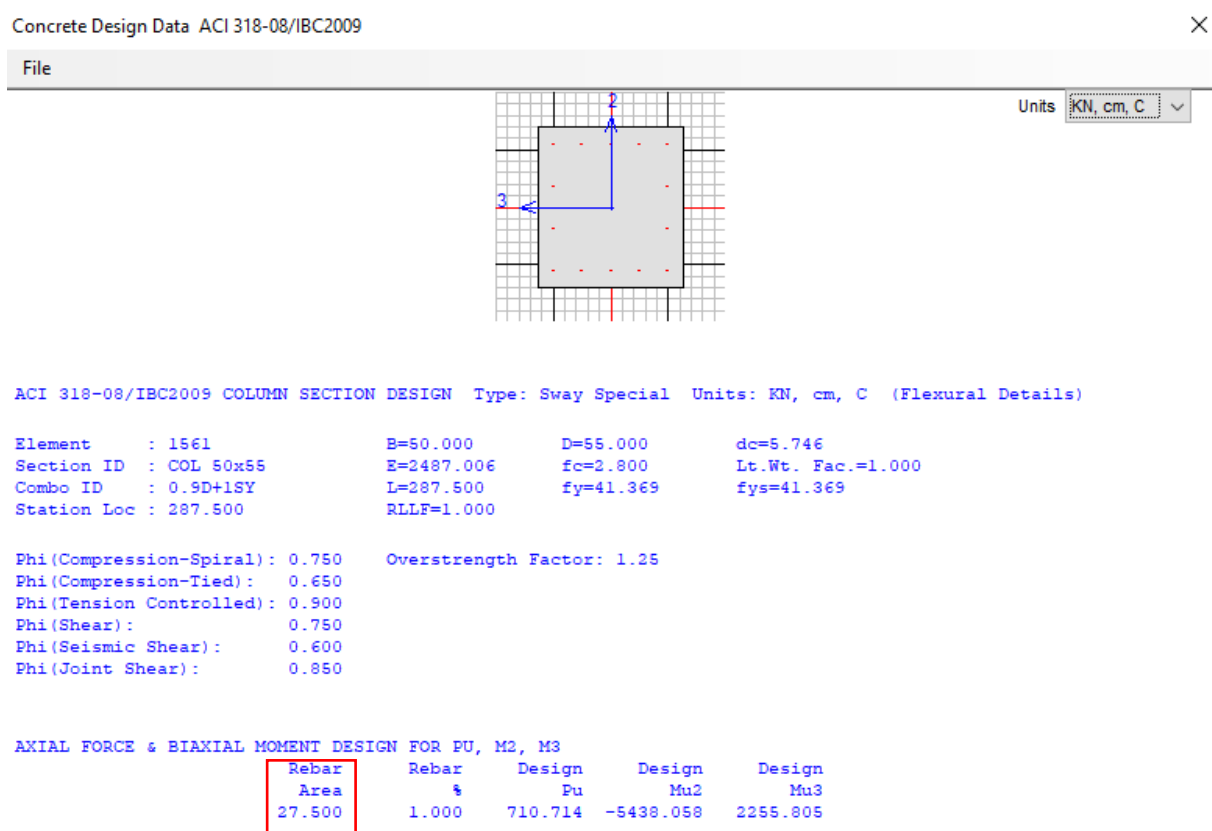


Figura 79. Pórtico C Columna más crítica, análisis en SAP 2000 Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el resumen del diseño a flexocompresión calculado con el programa SAP 2000 20 para el elemento descrito en la **figura 80**. Se muestra el código del diseño empleado la ACI 318-08 norma en la cual se fundamenta la NSR-10 Colombiana, se muestra la dimensión del elemento, Materiales como  $f'c$  y  $f_y$ , factor de seguridad  $\phi$  para compresion 0.65, se muestra la carga PU y momentos  $m_2=mx$  y  $m_3=my$  utilizados para el diseño, la combinacion de carga 0.9D+1Sy, el resultado muestra que se requiere 1% de refuerzo longitudinal lo cual corresponde a un area de acero  $A_s=27.5\text{cm}^2$  (Ver figura 80).



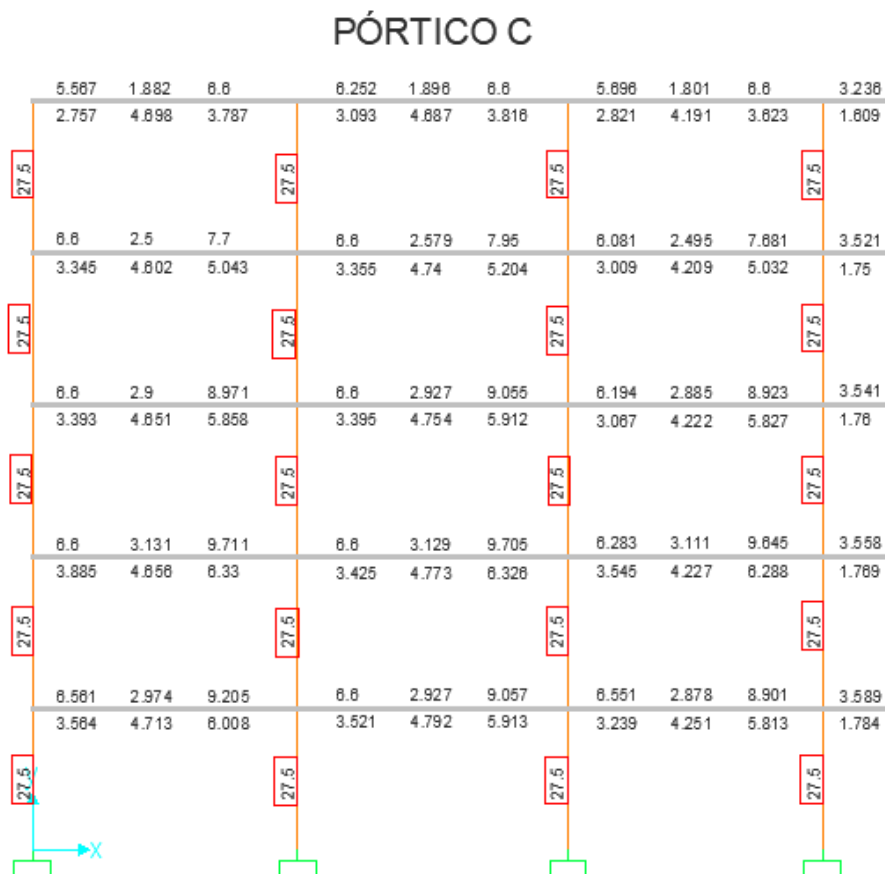
**Figura 80.** Cuantía de diseño requerida, calculado en SAP 2000 20. **Fuente:** elaboración propia.

- **Refuerzo Longitudinal:** La NSR, (2010) en el inciso C.10.9.1 establece lo siguiente: El area de acero elongitudinal,  $A_s$ , para elementos a compresion no debe ser menor que  $0.001A_t$ , ni mayor que  $0.004A_t$  para estructuras en DMO y DES. Asi mismo,

en C.10.9.2 se define que el numero minimo de barras longitudinales en elementos a compresion debe ser de 4 para barras dentro de estribos circulares o rectangulares.

A continuación, se presentan los valores de cuantías de acero correspondiente al diseño de elementos verticales, diseño apoyado en la herramienta SAP 2000 20. UNIDADES **As:** **cm<sup>2</sup>**

Como se observa en la **figura 81** las columnas de 50cmx55cm requieren cuantia del 1% de acero longitudinal lo cual corresponde a un area de acero  $As=27.5\text{cm}^2$ . De acuerdo a lo anterior, se establece inicialmente utilizar 14 barras 5/8'' lo cual corresponde a un area de refuerzo  $As=27.86\text{cm}^2$ .



**Figura 81.** Diseño del refuerzo longitudinal de columnas (As). **Fuente:** elaboración propia en SAP2000 20.

▪ **Refuerzo Transversal.** : La NSR, (2010) en el inciso C.7.10.5.1 establece lo siguiente: todas barras no preesforzadas deben estar confinadas por medio de estribos transversales de por lo menos diametro No. 3 para barras longitudinales No. 10 o menores.

▪ C.7.10.5.2 el espaciamiento vertical de los estribos no debe exceder 16 diametros de barra longitudinal, 48 veces la barra de estribos o la menor dimensión del elemento sometido a compresión.

▪ C.21.3.5.7 El area total de la sección transversal del refuerzo de estribos cerrados de confinamiento rectangulares,  $A_{sh}$ , colocados en longitud  $L_o$  no debe ser menor que la requeridad por las siguientes ecuaciones:

$$A_{sh} = 0.2 \frac{s b_c f'_c}{F_{yt}} \left[ \left( \frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad \text{(Ecuación 28)}$$

$$A_{sh} = 0.06 \left[ \frac{s b_c f'_c}{F_{yt}} \right] \quad \text{(Ecuación 29)}$$

**Donde;** S es la separación,  $b_c$  es la longitud critica,  $f'_c$  es la resistencia a la compresión del concreto,  $A_g$  es el área de la sección del elemento,  $A_{ch}$  es el área critica,  $F_{yt}$  es la fluencia del acero.

Como se observa en la **la figura 82** para columnas de sección 50cmx55cm en cuanto al acero de refuerzo transversal re requiere la siguiente relacion de área de acero  $A_v$  y separación de los estribos S,  $A_v/S=0.101$ . lo anterior se considera la condicion mas critica en cuanto a requerimiento en acero de estribos.



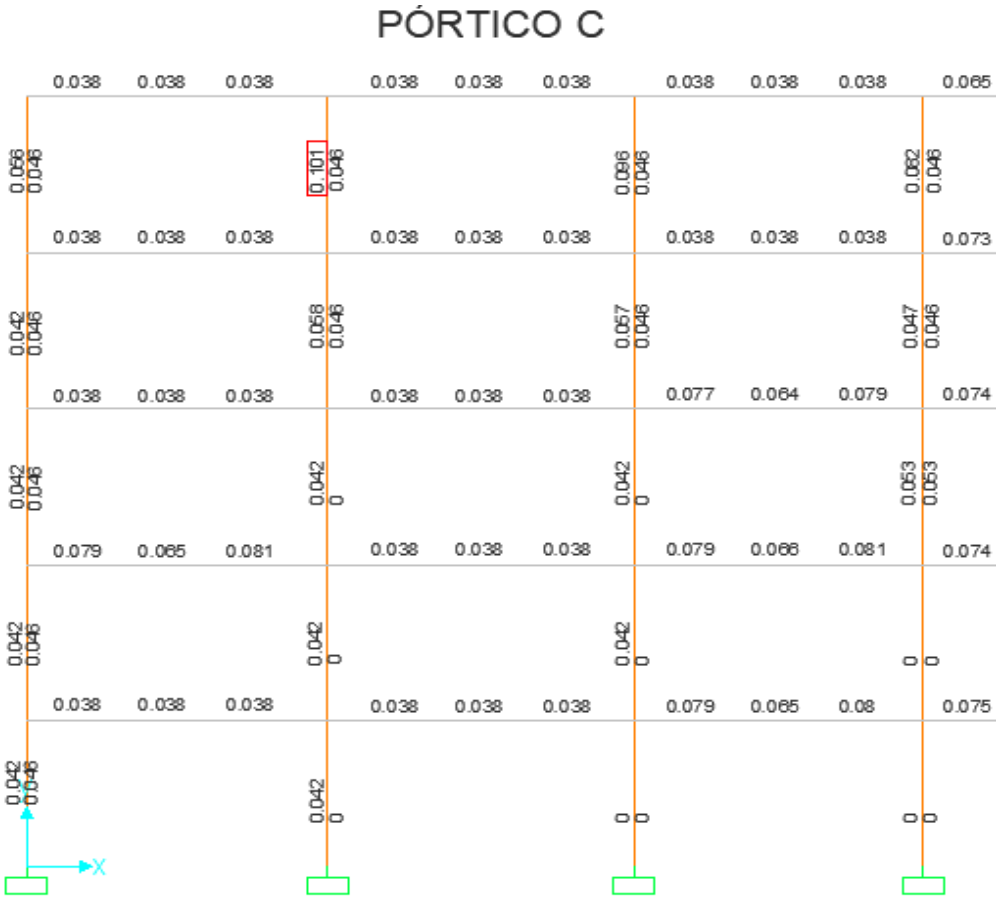


Figura 82. Diseño del refuerzo Transversal de columnas (Av/S). Fuente: elaboración propia en SAP2000 20.

En lo siguiente, se muestra los Requisitos generales para el armado de columnas en **DMO** de acuerdo a la norma sismo resistente Colombiana NSR-10. Se debe cumplir con cada una de las indicaciones mostradas (Ver figura 83).

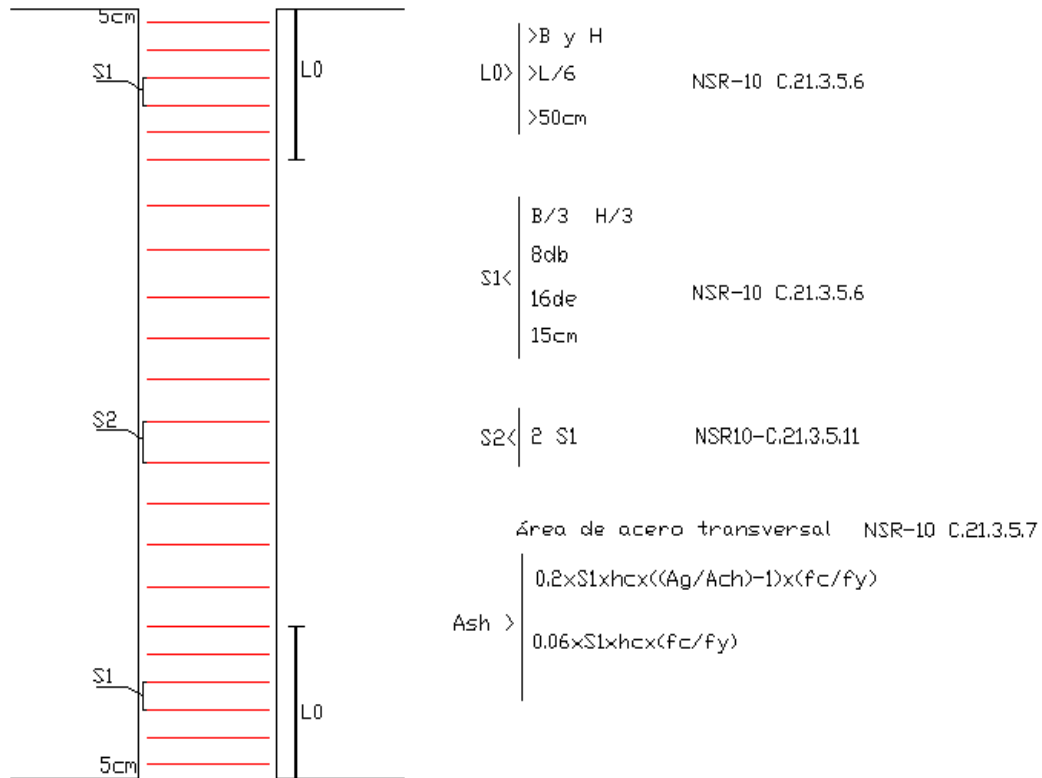


Figura 83 Requisitos para el armado sismo resistente de columnas en DMO Fuente: NSR, (2010).

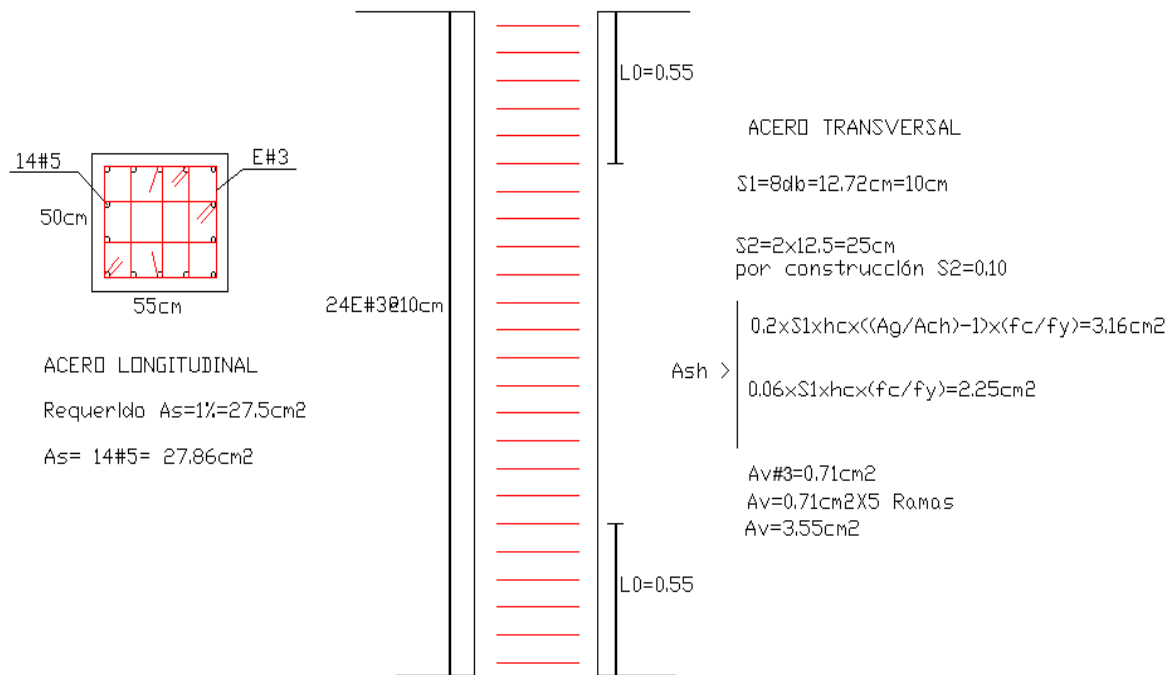
A continuación, utilizando las ecuaciones 28 y 29 se calcula el área de refuerzo transversal mínimo que debe tener el diseño de acuerdo con los requerimientos de la NSR-10, Se escoge el mayor valor de los calculados.

$$A_{sh} = 0.2 \frac{(10\text{cm}) \times (45\text{cm}) \times (280\text{kg/cm}^2)}{4200\text{kg/cm}^2} \left[ \left( \frac{50\text{cm} \times 55\text{cm}}{45\text{cm} \times 40\text{cm}} \right) - 1 \right] = 3.16\text{cm}^2 \text{ (Educación 28).}$$

$$A_{sh} = 0.06 \left[ \frac{10\text{cm} \times 45\text{cm} \times 280\text{kg/cm}^2}{4200\text{kg/cm}^2} \right] = 2.25\text{cm}^2 \text{ (Educación 29).}$$

- Longitud de gancho para estribos.** La NSR (2010) en título C inciso C.7.1.3 establece la longitud de gancho para barras No 5 o menores con doblez a 90° como 6db de extensión en el extremo libre. Para barras #3 L. Gancho=0.95cm x 6=6cm. Para diseño se define gancho de 10cm por factor de seguridad, cumpliendo con lo mínimo estipulado en la NSR-10.

A continuación, En la **figura 84** se muestra el armado de columnas en **DMO** de acuerdo con la norma sismo resistente Colombiana NSR-10, Considerando los requisitos de diseños. Se tiene cuantía de 1% para el acero longitudinal, Para el acero transversal  $A_v/S=0.101$ , además el acero transversal debe tener mínimo un área de acero de  $3.16\text{cm}^2$ .



**Figura 84.** Despiece de columna más crítica de acuerdo con el diseño en SAP 2000 y los requerimientos dados por la NSR-10. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en lo anterior (Ver **figura 84**) se define se define para el acero longitudinal 14 barras #5 cumpliendo con los requerimientos de la NSR-10 y con la cuantía requerida por diseño del 1%.

para el acero transversal se definen estribos #3 con separación en la zona de confinamiento y resto del elemento de 10cm teniendo en cuenta los criterios de la NSR-10. Se verifica el cumplimiento del área de acero transversal mínimo requerido de acuerdo con las ecuaciones 30 y 31 de la NSR-10 y de acuerdo con cuantía de diseño más crítica calculada con SAP 2000  $20 A_v/s=0.101$ .

- **Empalmes por traslapes de refuerzo longitudinal elemento a compresión.**

La NSR (2010), en C.12.16.1 establece lo siguiente: La longitud de empalme por traslapo en compresión debes ser  $0.071f_yd_b$ , para  $f_y$  igual a 420Mpa o menos.  $L_{\text{traslapo}} = 0.071 \times 420\text{Mpa} \times 15.87\text{mm} = 473\text{mm} = 47.32\text{cm}$ . Considerando lo anterior se definen en una longitud mínima de traslapo de 80cm para las barras longitudinales #5 de elementos a compresión (Ver figura 85).

- **Longitud de desarrollo acero.** La NSR (2010) en capítulo C inciso C12.3.1 establece que para las barras que pasan la unión columna-zapata se les debe garantizar la longitud de desarrollo. Como se indica a continuación en la ecuación 30

$$L_d = \frac{0.24d_b f_y}{\lambda \sqrt{f_r c}} > 0.043d_b f_y \leq 20\text{cm} \quad \text{(Ecuación 30)}$$

$$L_d = \frac{0.24(15.8\text{mm})420}{(1)\sqrt{28}} > 0.043(15.8\text{mmcm}) 420\text{Mpa} \leq 20\text{cm}$$

$$L_d = 30.27 > 28.53 \leq 20\text{cm}$$

$$L_d = 35\text{cm}$$

- **Longitud de gancho estándar.** La NSR (2010) en capítulo C inciso C.7.1.2 define gancho estándar la doblez de  $90^\circ$  de más de una extensión de  $12d_b$  en el extremo libre de la barra. Diámetro barra #5=1.59cm  $L_{\text{Gancho}} = 1.59\text{cm} \times 12 = 19\text{cm}$ . Lo anterior es la longitud mínima de gancho, Para el diseño se considera una longitud de 30cm por factor de seguridad.

A continuación, en la figura 85 se presenta el despiece detallado del diseño de una columna hasta el último nivel de la edificación, también se presenta el detalle de la sección transversal, detalle de estribos, empalmes del refuerzo longitudinal y demás detalles importantes en cuanto al diseño de columnas.

El diseño presentado a continuación (Ver figura 85), se realiza con las condiciones más críticas de la columna seleccionada (Ver figura 85), de acuerdo con lo anterior todas las columnas de la edificación tendrán esta configuración estructural.

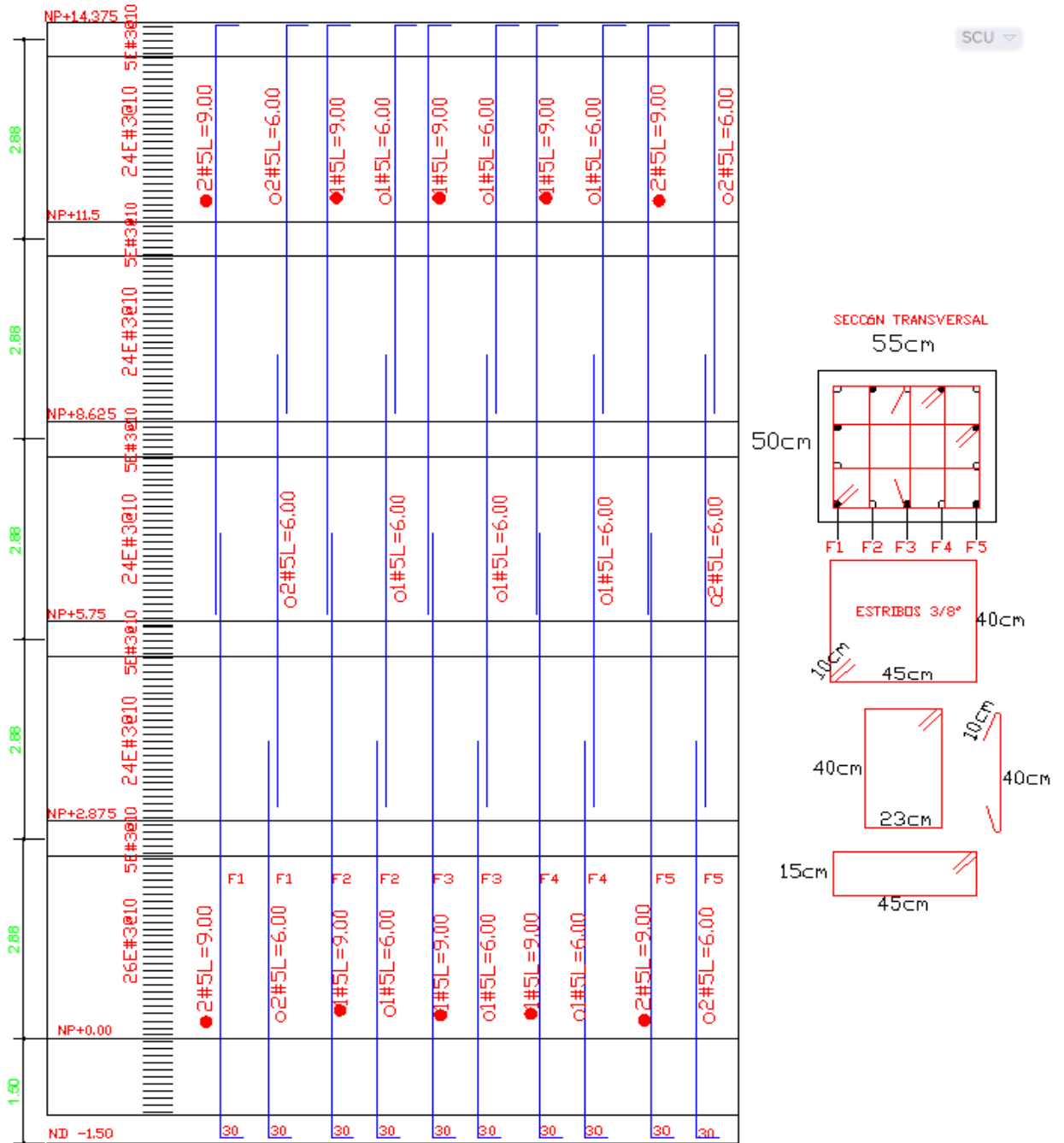


Figura 85. Despiece de columna más crítica de acuerdo con el diseño en SAP 2000 y los requerimientos dados por la NSR-10. Fuente: Elaboración propia.

▪ **Análisis por resistencia-Diagrama de iteración.** El diseño de un elemento a compresión se basa fundamentalmente en la resistencia de su sección transversal. La resistencia de diseño debe ser mayor o igual a la resistencia requerida; es decir,

$$(\Phi P_n, \Phi M_n) \geq (P_u, M_u)$$

Se genera un diagrama de iteración graficando la resistencia a la carga axial de diseño  $\Phi P_n$  en función de la correspondiente resistencia al momento de diseño  $\Phi M_n$ ; este diagrama define la resistencia utilizable de una sección para diferente carga últimas.

A continuación, se presenta el diagrama de iteración para el elemento a compresión que presenta la condición más crítica, es decir, el que presenta mayores solicitaciones, de acuerdo con el análisis realizado en SAP 2000 20, la columna del pórtico C seleccionada ver figura 86

A continuación, se presenta diferentes combinaciones de cargas últimas PU y momentos últimos MU que puede experimentar la columna seleccionada mostrada anteriormente (**Ver figura 79**) ante las solicitaciones. Las casillas que se muestran seleccionadas en la **Figura 86** corresponden a la condición de carga más crítica.

$$P_u = 1217.2 \text{ kN}$$

$$M_2 = M_{U_x} = 93.02 \text{ kNm}$$

$$M_3 = M_{U_y} = 137.45 \text{ kNm}$$

Element Forces - Frames

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Filter:

	Frame Text	Station m	OutputCase Text	CaseType Text	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text	ElemStation
	1561	0	1.4D	Combination	-1144.92	2.149	-2.281	-0.0358	-5.591	5.6843	1561-1	0
	1561	1.4375	1.4D	Combination	-1131.879	2.149	-2.281	-0.0358	-2.3124	2.5956	1561-1	1.4375
	1561	2.875	1.4D	Combination	-1118.838	2.149	-2.281	-0.0358	0.9662	-0.4931	1561-1	2.875
	1561	0	1.2D+1.6L+0.5Lr	Combination	-1217.213	2.291	-2.348	-0.0418	-5.9027	6.0173	1561-1	0
	1561	1.4375	1.2D+1.6L+0.5Lr	Combination	-1206.035	2.291	-2.348	-0.0418	-2.528	2.7236	1561-1	1.4375
	1561	2.875	1.2D+1.6L+0.5Lr	Combination	-1194.857	2.291	-2.348	-0.0418	0.8466	-0.5702	1561-1	2.875
	1561	0	1.2D+1.6L	Combination	-1203.454	2.292	-2.349	-0.0416	-5.8956	6.0122	1561-1	0
	1561	1.4375	1.2D+1.6L	Combination	-1192.276	2.292	-2.349	-0.0416	-2.5196	2.7179	1561-1	1.4375
	1561	2.875	1.2D+1.6L	Combination	-1181.098	2.292	-2.349	-0.0416	0.8563	-0.5765	1561-1	2.875
	1561	0	1.2D+1L+1SX	Combination	-1127.313	58.087	-1.774	-0.2927	-4.64	137.445	1561-1	0
	1561	1.4375	1.2D+1L+1SX	Combination	-1116.135	58.087	-1.774	-0.2927	-2.0897	53.9452	1561-1	1.4375
	1561	2.875	1.2D+1L+1SX	Combination	-1104.958	58.087	-1.774	-0.2927	0.4607	-29.5546	1561-1	2.875
	1561	0	1.2D+1L+1SY	Combination	-1111.629	-0.17	51.193	2.2151	93.0244	0.5814	1561-1	0
	1561	1.4375	1.2D+1L+1SY	Combination	-1100.451	-0.17	51.193	2.2151	19.4342	0.8255	1561-1	1.4375
	1561	2.875	1.2D+1L+1SY	Combination	-1089.274	-0.17	51.193	2.2151	-54.1559	1.0696	1561-1	2.875
	1561	0	0.9D+1SX	Combination	-743.164	57.345	-1.039	-0.2782	-2.7523	135.5145	1561-1	0
	1561	1.4375	0.9D+1SX	Combination	-734.781	57.345	-1.039	-0.2782	-1.2581	53.0808	1561-1	1.4375
	1561	2.875	0.9D+1SX	Combination	-726.398	57.345	-1.039	-0.2782	0.2361	-29.3528	1561-1	2.875
	1561	0	0.9D+1SY	Combination	-727.48	-0.911	51.928	2.2296	94.912	-1.3491	1561-1	0
	1561	1.4375	0.9D+1SY	Combination	-719.097	-0.911	51.928	2.2296	20.2657	-0.0389	1561-1	1.4375
	1561	2.875	0.9D+1SY	Combination	-710.714	-0.911	51.928	2.2296	-54.3806	1.2713	1561-1	2.875

Figura 86. Carga ultima Pu y momentos Últimos MUx MUy que llegan a la columna seleccionada del pórtico C, Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan diagramas de iteración nominal y de diseño de la columna definida, como se observa el diagrama de iteración cambia de acuerdo a la dirección del momento (Ver figuras 87, 88, 89 y 90).

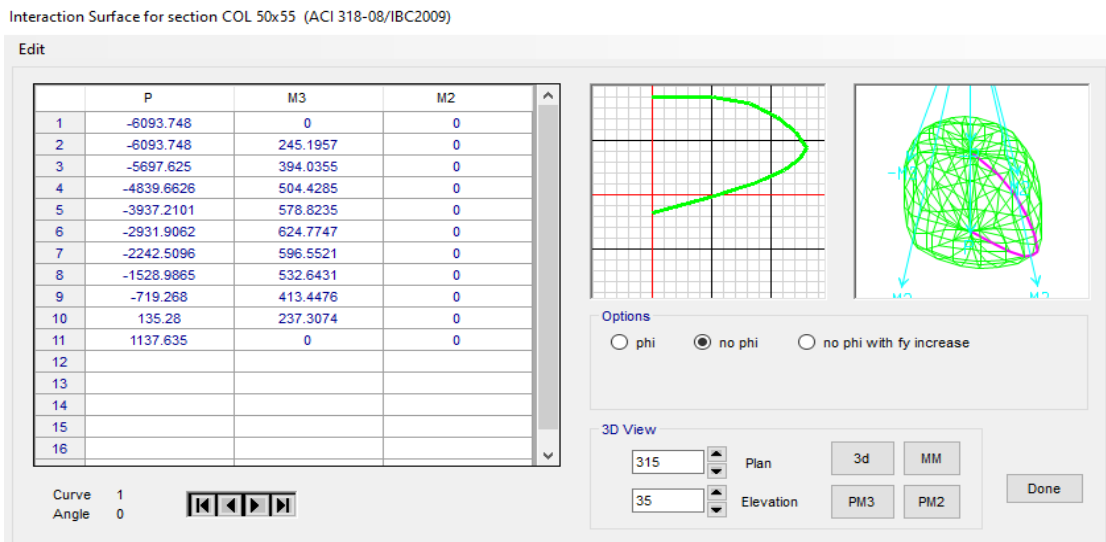


Figura 87. Valores y diagrama de iteración nominal con Pu y My, Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000.

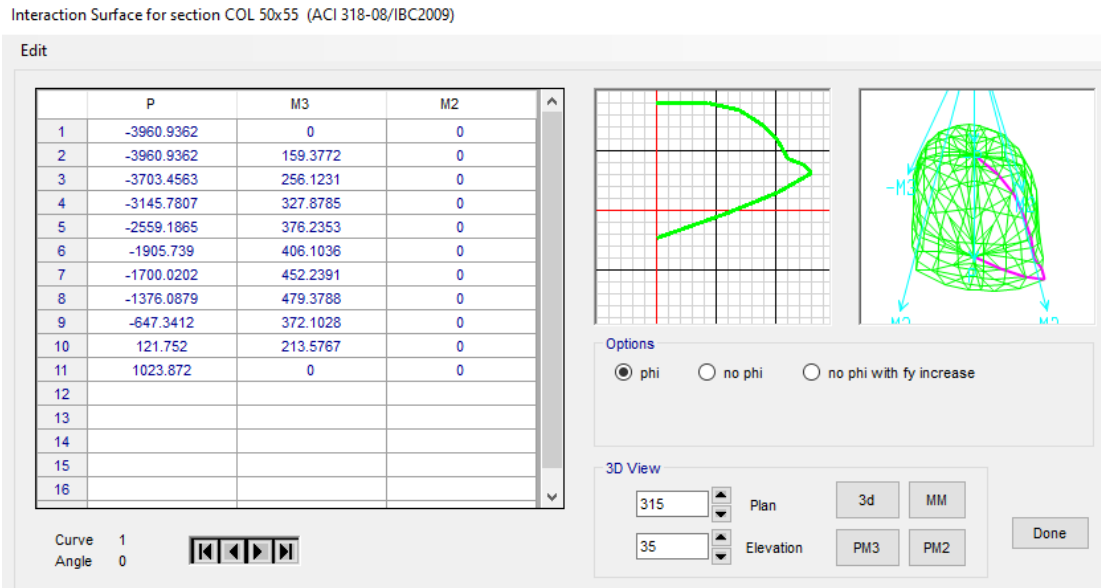


Figura 88. Valores y diagrama de iteración de diseño con  $P_u$  y  $M_y$ , Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000.

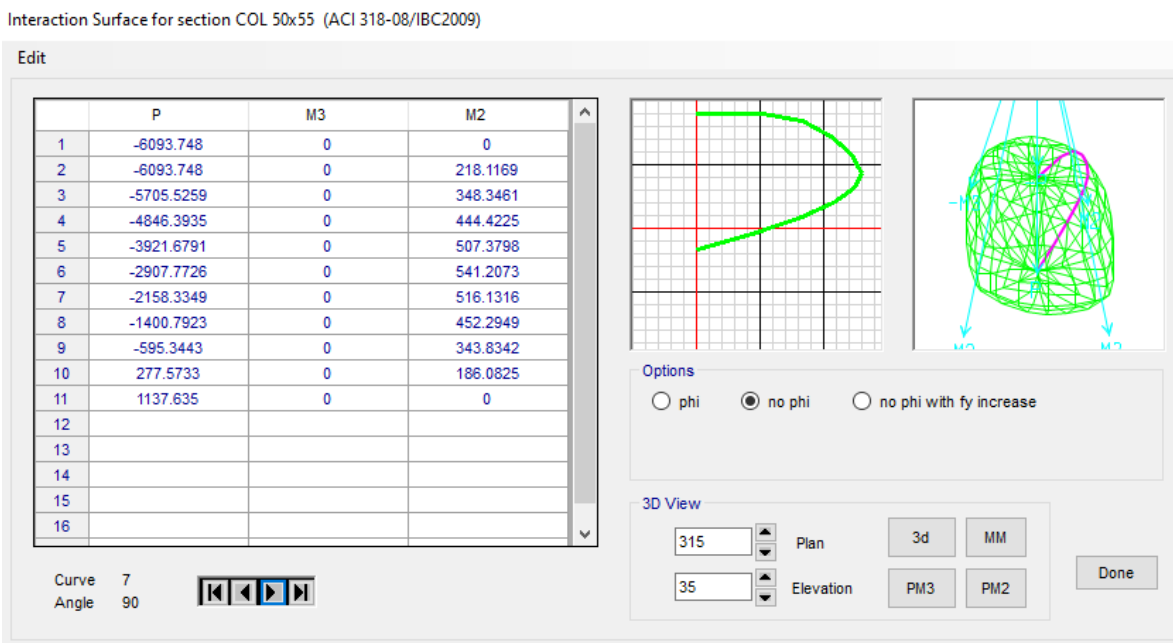
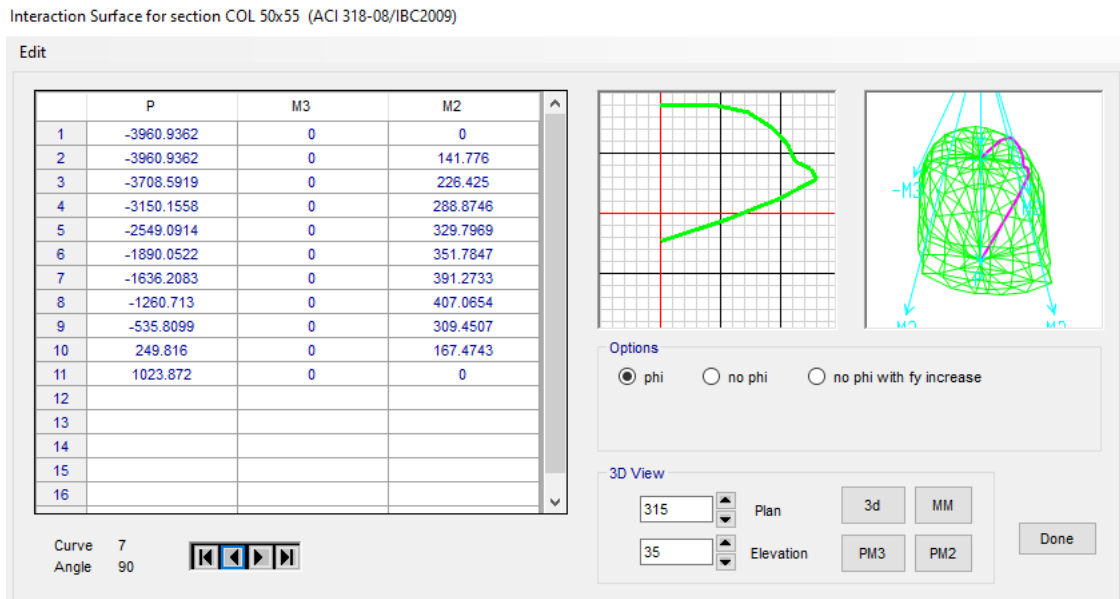


Figura 89. Valores y diagrama de iteración nominal con  $P_u$  y  $M_x$ , Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000.





**Figura 90.** Valores y diagrama de iteración de diseño con  $P_u$  y  $M_x$ , **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000.

A continuación se presenta diagramas de iteración nominal y de diseño de la columna seleccionada en el portico C, se presenta los puntos de las cargas últimas combinadas que llegan a la columna de lo cual se puede apreciar que el elemento resiste las solicitaciones aplicadas, **la figura 91** muestra el diagrama de iteración con momento en dirección X y se grafica el punto crítico  $P_u=1217.2\text{kN}$  y  $M_2=M_{U_x}=93.02\text{kNm}$

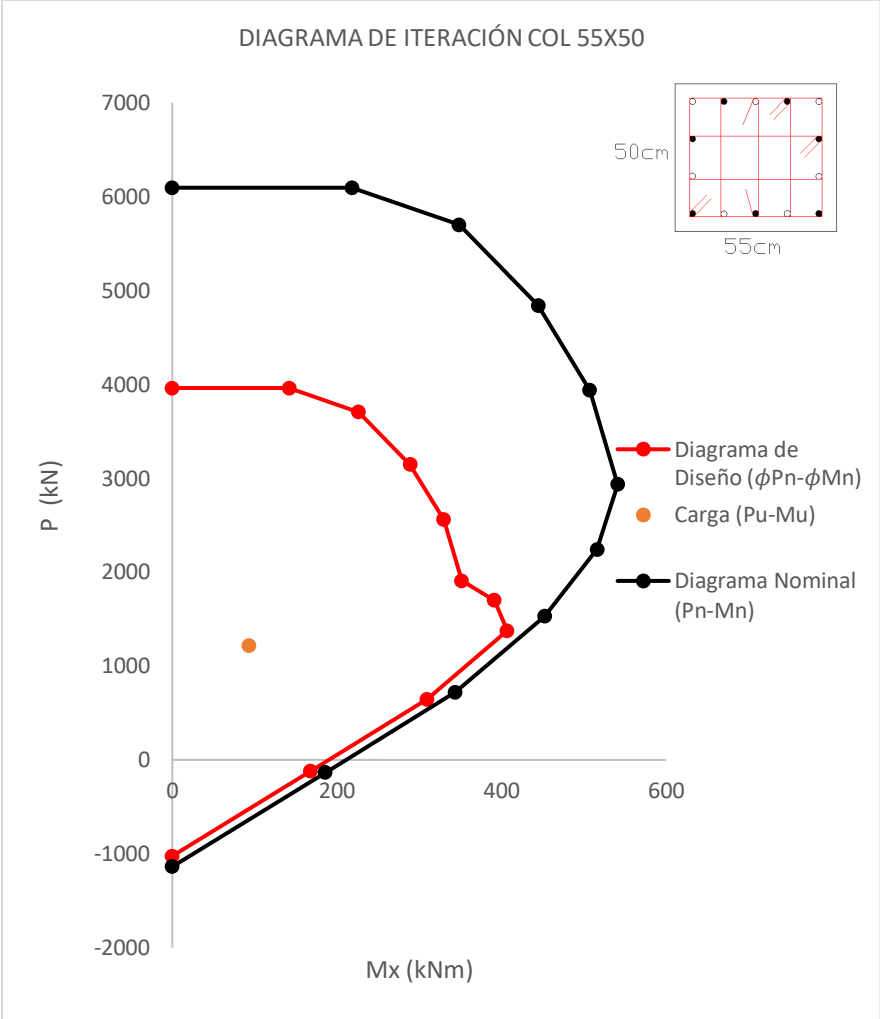
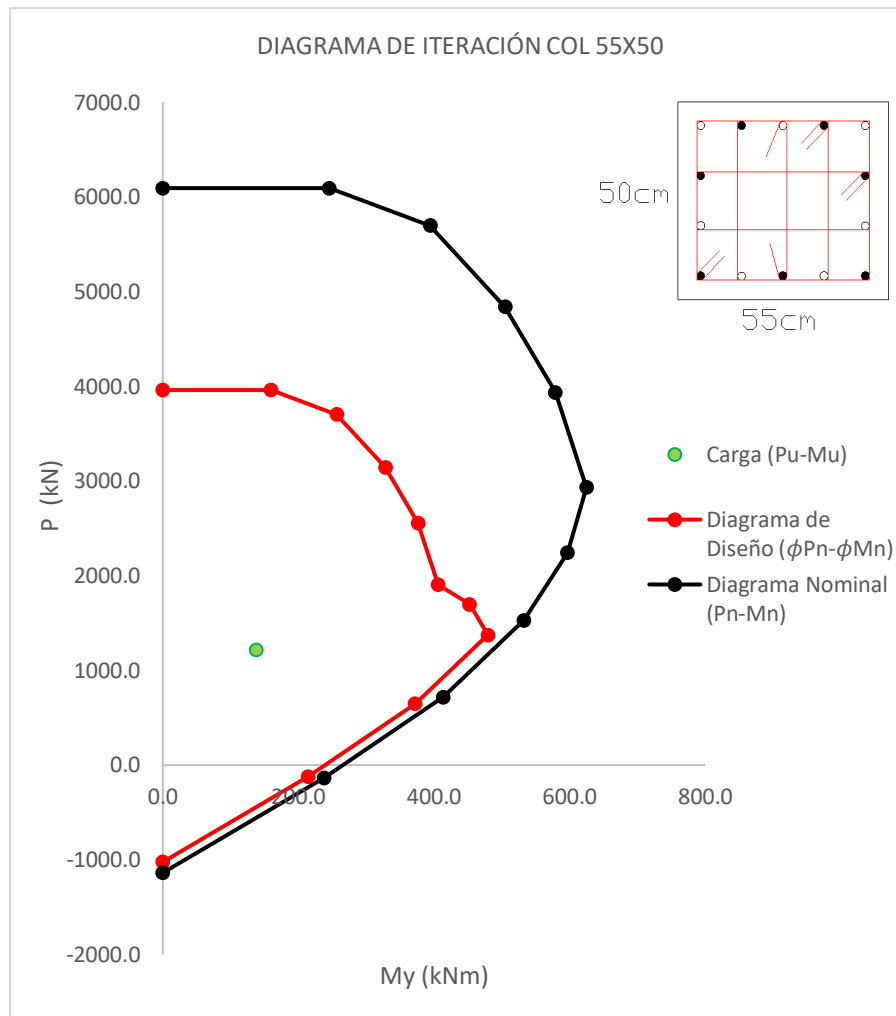


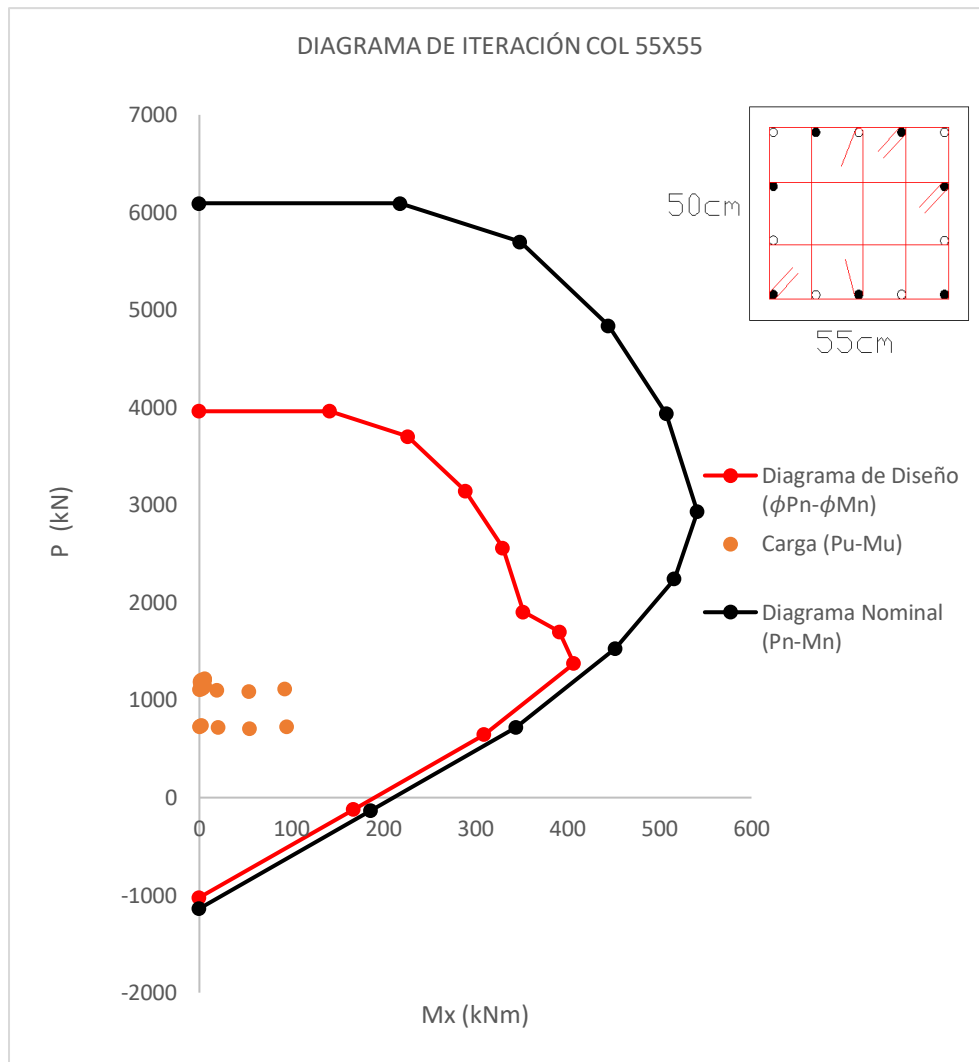
Figura 91. Diagrama de iteración nominal y de diseño con  $P_u$  y  $M_x$ , ubicando el punto crítico. Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación, la **figura 92** muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección Y, se grafica el punto crítico  $P_u=1217.2\text{kN}$  y  $M_3=M_{Uy}=137.45\text{kN.m}$ , la columna resiste.



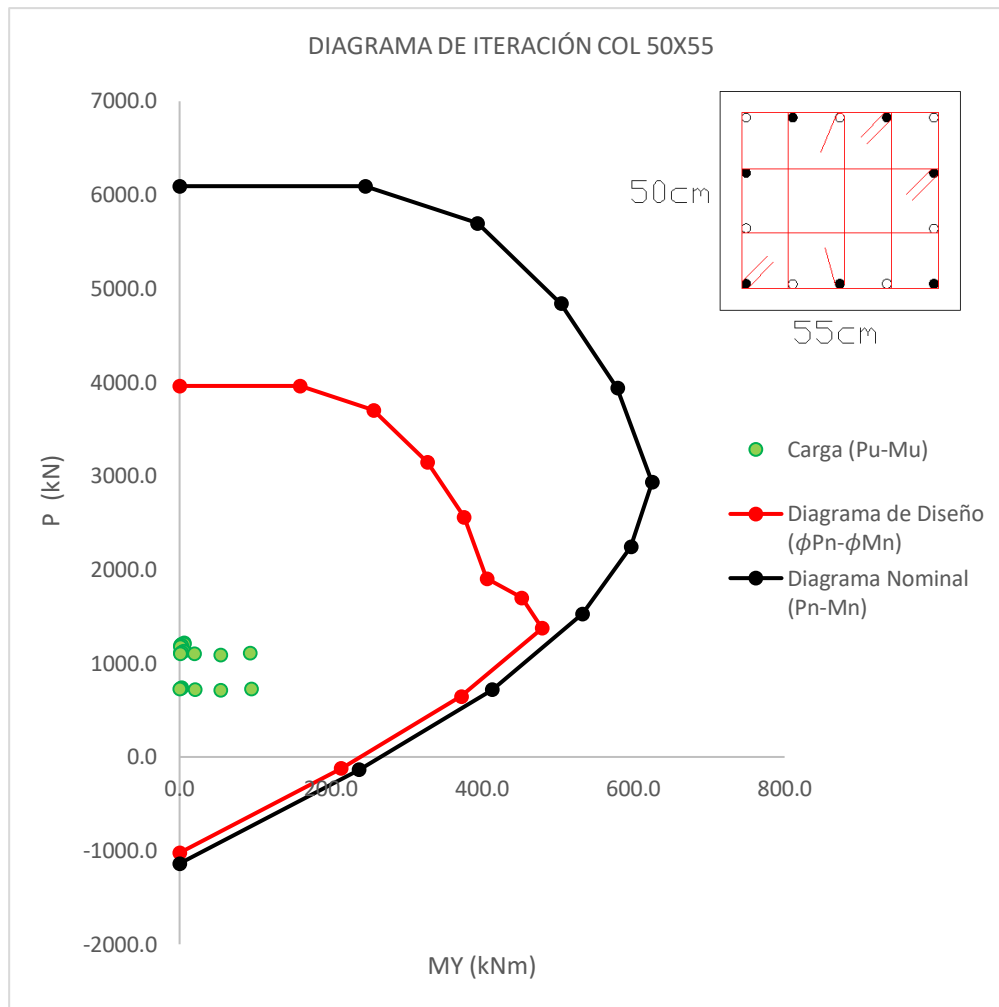
**Figura 92.** Diagrama de iteración nominal y de diseño con  $P_u$  y  $M_y$ , ubicando el punto crítico. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación, la **figura 93** muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección X, se grafica de todas las combinaciones de cargas utilizadas en diseño  $P_u$  y  $M_{uX}$ , la columna resiste.



**Figura 93.** Diagrama de iteración nominal y de diseño con  $P_u$  y  $M_x$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación, la **figura 94** muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección Y, se grafica de todas las combinaciones de cargas utilizadas en diseño  $P_u$  y  $M_{Uy}$ , la columna resiste.



**Figura 94.** Diagrama de iteración nominal y de diseño con  $P_u$  y  $M_y$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

NOTA: Los resultados de los diagramas de iteración nos indican que la columna es capaz de resistir las sollicitaciones que pueden llegar a los elementos. Para esta investigación no se realizó análisis dinámico espectral, el sismo solo se evaluó aplicando el método de fuerza horizontal equivalente FHE.

▪ **Cálculos de Cantidades de Aceros:**

A continuación, en la **tabla 26** se presenta una memoria de calculo que consiste en la determinación de la cantidad de acero en Kilogramos de los elementos tipo columnas, El procedimiento de cálculo es el siguiente:

En las primeras casillas tenemos una cantidad de 2528 barras de 3/8'' de 1.9m de longitud. Inicialmente se debe multiplicar 2528barras x 1.9m = 4803m, posteriormente se multiplica el valor 4803m por el peso específico de la barra 4803m x 0.56kg/m=2689.6kg. Este procedimiento es el mismo para las demás barras, al final se suman los totales y tenemos el total en kg de aceros de las vigas de la estructura.

**Tabla 26.**

*Cálculo de las cantidades de acero de columnas de la estructura dadas por el diseño, los resultados están en términos de masas kg por cada tipo de barra.*

Cálculo de cantidades de acero de elementos tipo columnas de toda la edificación												
Cantidad	Longitud de corte (m)	6mm	8mm	1/4''	3/8''	1/2''	5/8''	3/4''	7/8''	1'	1 1/8''	1 1/4''
		D. 6M	D. 8M	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
2528	1.9				4803							
2528	1.46				3691							
2528	0.6				1517							
2528	1.4				3539							
224	9						2016					
336	6						2016					
Peso nominal varilla de acero (kg/m)		<b>0.22</b>	<b>0.39</b>	<b>0.25</b>	<b>0.56</b>	<b>0.99</b>	<b>1.55</b>	<b>2.24</b>	<b>3.04</b>	<b>3.97</b>	<b>5.06</b>	<b>6.40</b>
Metros lineales		0	0	0	13550	0	4032	0	0	0	0	0
Peso Kilos		0	0	0	7588	0	6258	0	0	0	0	0
<b>Peso Total (Kg)</b>		<b>13846</b>										

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, en la **tabla 27** se presenta una memoria de calculo que consiste en la determinación de la cantidad de acero en Kilogramos de los elementos tipo viga. igualmente,

se aplica el procedimiento de cálculo descrito para columnas. Consta de multiplicar la cantidad de barras por la longitud y luego multiplicar por el peso específico de la barra, de esa forma se obtiene la cantidad(kg) de acero de la estructura.

**Tabla 27.**

*Cálculo de las cantidades de acero de vigas de la estructura dadas por el diseño, los resultados están en términos masas kg por cada tipo de barra.*

Cálculo de cantidades de acero de elementos tipo vigas de toda la edificación												
Cantidad	Longitud de corte (m)	6mm	8mm	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1'	1 1/8"	1 1/4"
		D. 6M	D. 8M	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
2640	1.78				4699							
870	0.52				452							
40	4.5					180						
40	10					400						
40	5					200						
40	11.5					460						
80	7					560						
40	6					240						
40	9					360						
40	4					160						
45	6.5						292.5					
40	12						480					
50	4						200					
60	9						540					
40	5.5						220					
40	7.5						300					
5	5						25					
5	2.5						12.5					
10	4						40					
10	2						20					
5	6.5						32.5					
5	12						60					
20	9							180				
40	9								360			
Peso nominal varilla de acero (kg/m)		<b>0.22</b>	<b>0.39</b>	<b>0.25</b>	<b>0.56</b>	<b>0.99</b>	<b>1.55</b>	<b>2.24</b>	<b>3.04</b>	<b>3.97</b>	<b>5.06</b>	<b>6.40</b>
Metros lineales		0	0	0	5152	2560	2223	180	360	0	0	0
Peso Kilos		0	0	0	2885	2545	3449	402	1095	0	0	0
<b>Peso Total (Kg)</b>		<b>10376</b>										

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

## 7 Determinación del grado de corrosión y aplicación de correlación.

A continuación, se muestran una serie de pasos para obtener un porcentaje de grado de corrosión que podría experimentar la estructura considerando un lapso de 50 años de y teniendo en cuenta las variables que interactúan en el proceso y las correlaciones definidas anteriormente.

### 7.1. Determinación de la porosidad del concreto.

según el modelo de (Powers , Copeland, & Mann, 1959) La porosidad del concreto puede ser expresada de la siguiente forma:

$$n_p(\%) = \frac{(w/c)^{-0.36\alpha}}{(w/c)+0.32} \times 100 \quad (\text{Ecuación. 31})$$

EL Valor de  $\alpha(max)$  puede ser calculado con la siguiente expresión.

$$\alpha(max) = \frac{w/c}{0.36} \leq 1 \quad (\text{Ecuación. 32})$$

$$\alpha(max) = \frac{190/420}{0.36} \leq 1 \quad \alpha(max) = 1.25 < 1 \quad \alpha = 1$$

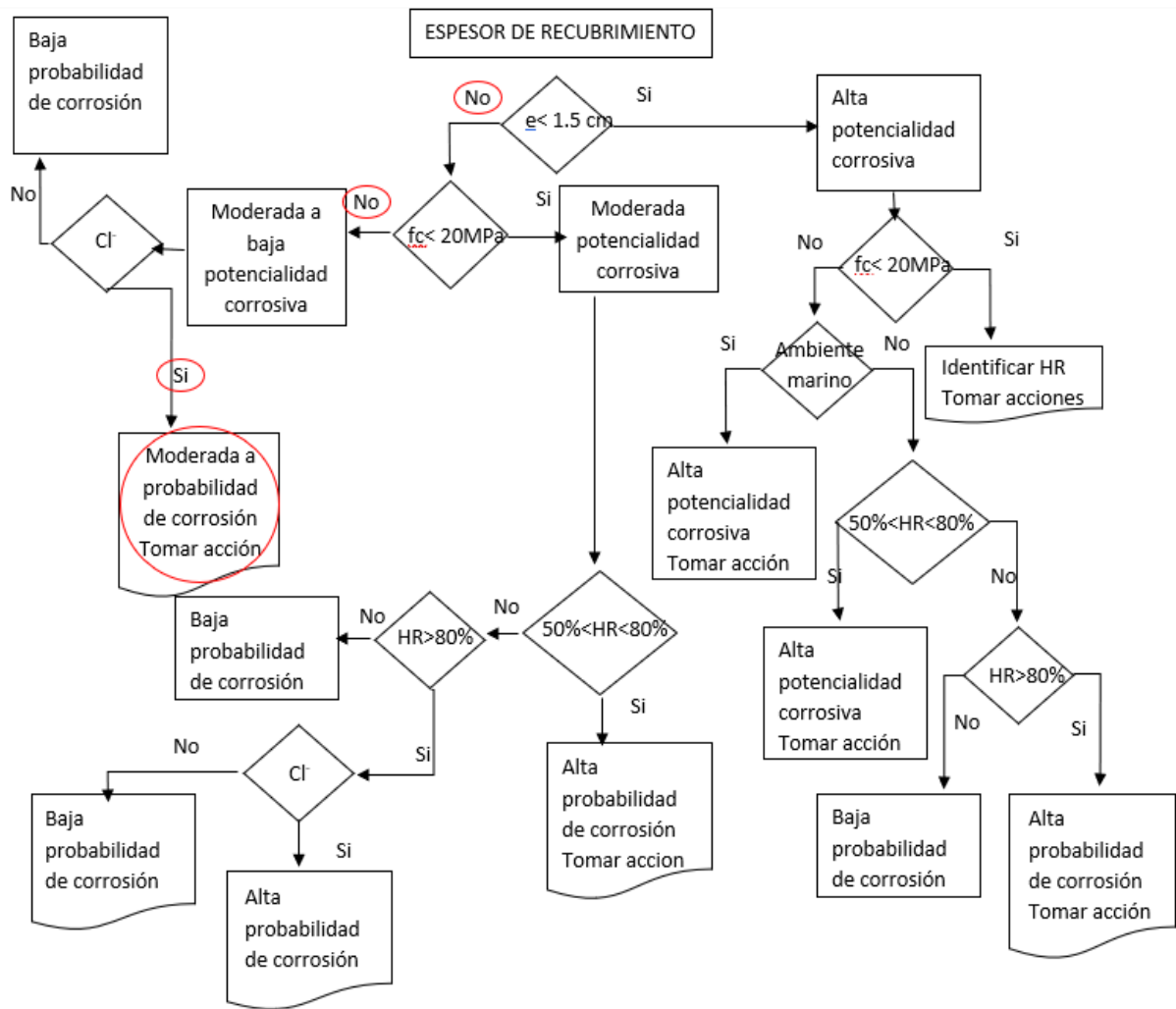
$$n_p(\%) = \frac{(0.452)^{-0.36(1)}}{(0.452)+0.32} \times 100 \quad n_p(\%) = 11.91$$

### 7.2. Diagnóstico de corrosión, considerando la variable espesor de recubrimiento.

Este diagnóstico consiste en determinar de manera cualitativa la probabilidad de corrosión que podría experimentar una estructura de concreto reforzado en función de la variable “espesor de recubrimiento”. Los posibles resultados que se puedan dar son: Una Baja, Moderada y alta probabilidad de corrosión. Se describe el procedimiento donde, inicialmente se evalúa si, espesor de recubrimiento  $e < 1.5\text{cm}$  en nuestro caso  $e = 4\text{cm}$  nos vamos con la opción “No”, luego si la resistencia a la compresión del concreto  $f'_c < 20\text{Mpa}$  en el diseño  $f'_c = 28\text{MPa}$  por lo cual, se selecciona la opción “No”, Posteriormente se pregunta si



hay o no presencia de cloruros en el ambiente de la zona, en el caso la respuesta es sí (Ver inciso 4.2) por lo cual, el resultado del análisis es: *Moderada Probabilidad de corrosión*. A continuación, la **Figura 95** muestra el detallado del procedimiento para determinar la probabilidad de corrosión para esta variable.



**Figura 95.** Nota. Resultado Diagnóstico: Moderada probabilidad de corrosión. **Fuente:** Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pàg. 145.

### 7.3. Diagnóstico de corrosión, considerando la variable Calidad de Hormigón.

Al igual que el procedimiento anterior consiste en determinar de manera cualitativa la probabilidad de corrosión que podría experimentar una estructura de concreto reforzado en

función de la variable “Calidad del hormigón”. Los posibles resultados que se puedan dar son:

Una Baja, Moderada y alta probabilidad de corrosión. El grafico también incluye otras variables como; Resistencia a la compresión  $f_c$ , Cloruros,  $CO_2$ , Porosidad del concreto y espesor de recubrimiento, el resultado obtenido es: Moderada Probabilidad de corrosión

(Ver figura 96).

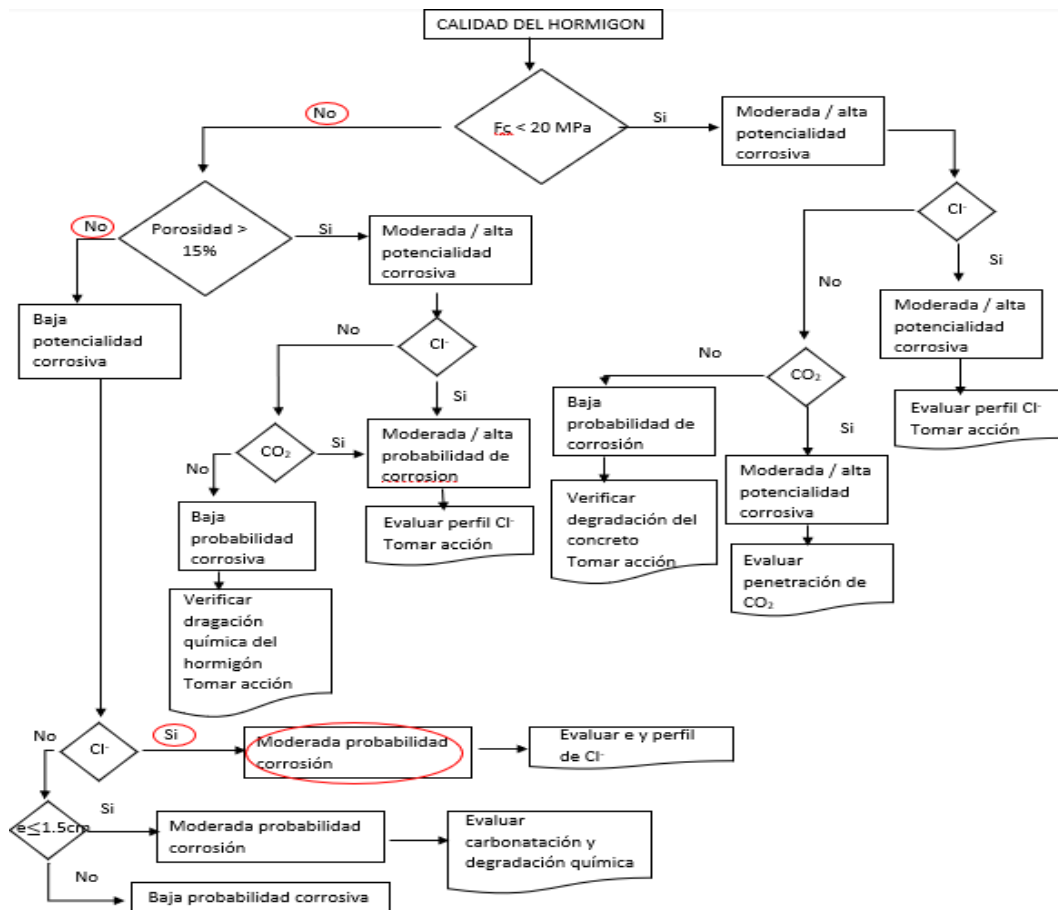


Figura 96. Nota. Resultado Diagnóstico: Moderada probabilidad de corrosión. Fuente: Tomado de DURAR (1997). Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico en estructuras de hormigon armado. Pág. 144.

**7.4. Determinación de la intensidad de corrosión  $i_{corr}$ .** Con el fin de evaluar la

situación más crítica para la estructura seleccionamos un valor de intensidad de corrosión  $I_{corr}=0.5mA/cm^2$ . Considerando la tabla 28 que relaciona el nivel de corrosión de forma cualitativa obtenido en los parámetros anteriores y la intensidad de corrosión  $I_{corr}$ .

**Tabla 28.**

Niveles de corrosión para diferentes rangos de intensidad  $i_{corr}$ .

$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevada
> 1	Muy elevada

**Nota. Fuente:** Standard Test Method for Half-Ce11 Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. (ASTM C876-87, 1987).

**7.5. Determinación de la intensidad de corrosión  $i_{corr}$ .** El valor de la intensidad de corrosión  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) se puede convertir en términos de pérdida de la sección de la barra de acero (mm/años) empleando la ley de Faraday de la siguiente forma:

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{Año}} = \frac{M}{\delta n F} * i_{corr} = 11.6 * i_{corr} \quad (\text{Ecuación. 33})$$

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{Año}} = \frac{M}{\delta n F} * i_{corr} = 11.6 * 0.5 \text{mA}/\text{cm}^2 = 5.8 \frac{\mu\text{m}}{\text{Año}}$$

Para efecto de estudio de la investigación se considera un tiempo de 50 años para la evaluación de la corrosión por lo cual se estima la pérdida de sección de las barras de refuerzo de la siguiente forma:

$$5.8 \frac{\mu\text{m}}{\text{Año}} \times 50 \text{ Años} = 290 \mu\text{m} = 0.29 \text{mm}$$

El anterior resultado nos indica que las barras de refuerzo en un tiempo de 50 años perderán 0.29mm de diámetro de sección transversal.

**7.6. Cálculo del porcentaje de pérdida de acero de la estructura en lapso de 50 años (Grado de corrosión).** A continuación, en la **tabla 29** se presenta el cálculo del porcentaje de pérdida de masa que podría sufrir la estructura en un lapso de 50 años considerando las barras de acero que se han empleado para el diseño de la edificación.

**Tabla 29.**

*Cálculo del porcentaje de pérdida de sección de las barras de acero para el lapso de 50 años según el grado de intensidad de corrosión.*

#Barra	Diámetro Inicial	Área (mm <sup>2</sup> )	Perdida de Diámetro (mm)	Diámetro Final	Porcentaje de pérdida por cada barra
#3	9.5	71	0.29	9.21	3.05%
#4	12.7	129		12.41	2.28%
#5	15.9	199		15.61	1.82%
#6	19.1	284		18.81	1.52%
#7	22.2	387		21.91	1.31%

*Nota. Fuente:* Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, en la **tabla 30** se presenta el cálculo del grado de corrosión en términos de pérdida de masa de toda la estructura, considerando las cantidades de barras de acero de cada elemento en el diseño (Ver tabla 26 y 27) y los porcentajes de pérdida masa en kilogramos de acero para el lapso de 50, dichos porcentajes fueron determinados utilizando la ley de Faraday (Ecuación 33). Finalmente, se determinada que para un tiempo de 50 años se produce un 2.37% de corrosión de la armadura del edificio.

**Tabla 30.**

*Cálculo del porcentaje de pérdida de masa de toda la estructura para un lapso de 50 años.*

N.º Barra	Masa(Kg)	% De pérdida	Pérdida de Masa(Kg)
#3	10473	3.05%	320
#4	2545	2.28%	58
#5	9707	1.82%	177
#6	402	1.52%	6
#7	1095	1.31%	14
Total	24222	2.37%	575
<b>Grado de corrosión (2.37%)</b>			

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

### 7.7. Aplicación de la correlación, pérdida de resistencia a la compresión y grado de corrosión.

Según la figura 21 se puede correlacionar la pérdida de la resistencia a la compresión por un grado de corrosión que se ha obtenido. A continuación, citamos la ecuación 5 con la cual se determina el porcentaje de pérdida de  $f'_c$  de la siguiente forma:

$$\downarrow F'C(\%) = 0.7964 NC(\%) + 0.5574 \quad (\text{Ecuación. 5})$$

Donde:  $\downarrow F'C$  es la disminución de la resistencia a la compresión y  $NC$  es el Nivel de Corrosión. Se reemplaza en la ecuación el grado de corrosión obtenido 2.37%

$$\downarrow F'C(\%) = 0.7964 (2.37\%) + 0.5574$$

$$\downarrow F'C(\%) = 2.45\%$$

La resistencia a la compresión de diseño es de  $f'_c=28\text{Mpa}$ , los resultados nos dan a conocer que para el lapso de 50 años la resistencia disminuye en un 2.45% por efectos de la corrosión del refuerzo considerando las variables aplicadas (Presencia de concentración de cloruros, recubrimiento de concreto y calidad del hormigón). Resistencia a la compresión final es de 27.31MPa.

### 8. Efectos de la corrosión desde el punto de vista estructural.

En esta investigación se ha analizado el efecto de la corrosión para un estudio de caso de una edificación, enfocado principalmente en dos partes; la determinación del grado de corrosión de la estructura en términos de pérdida de masa del refuerzo y la variación de la resistencia a la compresión debido a cierto porcentaje de corrosión, utilizando correlaciones empíricas, las cuales se obtienen de una revisión amplia de la literatura. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se puede realizar un análisis de los efectos de la corrosión desde el punto de vista estructural. A continuación, se presentan ciertas modificaciones en la modelación para el estudio de caso.

En la modelación inicial en SAP 2000 se utiliza una resistencia a la compresión del concreto de 28MPa y un módulo de elasticidad de  $4700\sqrt{f'_c}$ , de acuerdo con el análisis por corrosión la resistencia a la compresión de la estructura en estudio disminuye un 2.45%, por lo cual, la resistencia a la compresión final sería de 27.31MPa, por lo tanto, el módulo de elasticidad final también se modifica dando como resultado 24561716KPa. La Figura 97 presenta las modificaciones realizadas en SAP 2000 para la nueva modelación estructural.

The image shows a screenshot of the 'Material Property Data' dialog box in SAP 2000. The dialog is organized into several sections:

- General Data:**
  - Material Name and Display Color: 27.31MPa
  - Material Type: Concrete
  - Material Grade: f'c 3901psi
  - Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:**
  - Weight per Unit Volume: 23.5631
  - Mass per Unit Volume: 2.4028
  - Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:**
  - Modulus Of Elasticity, E: 24561716
  - Poisson, U: 0.2
  - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06
  - Shear Modulus, G: 10234048
- Other Properties For Concrete Materials:**
  - Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 27310
  - Expected Concrete Compressive Strength: 27310
  - Lightweight Concrete
  - Shear Strength Reduction Factor: (empty field)

At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' (unchecked) and two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

**Figura 97.** Modificaciones de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto en SAP 2000.  
**Fuente:** elaboración propia en SAP2000.

A continuación, se presenta diferentes análisis para comparar el comportamiento de la estructura modelada inicialmente y la modelación considerando los cambios por corrosión. Se

estudia el comportamiento de derivas, diagramas de iteración de columnas, cuantías de diseño y capacidad de resistencia de secciones de vigas.

### 8.1. Análisis de derivas considerando el cambio producto de la corrosión.

Considerando la modificación realizada en la resistencia a la compresión se realiza en análisis de derivas comparando con las condiciones normales de análisis. A continuación, se muestra los resultados del análisis de derivas antes y después de aplicar los cambios por corrosión, utilizando la combinación 1.2D+1EX+1L para el pórtico C. (Ver figura 98 y 99)

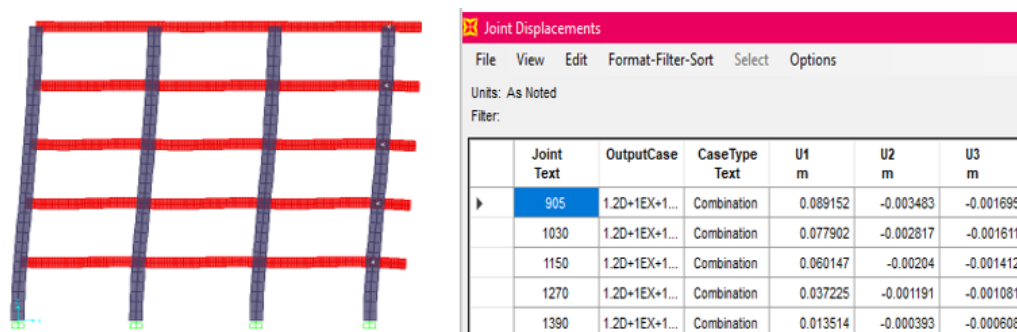


Figura 98. Derivas totales para el pórtico C, Condiciones iniciales. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000.

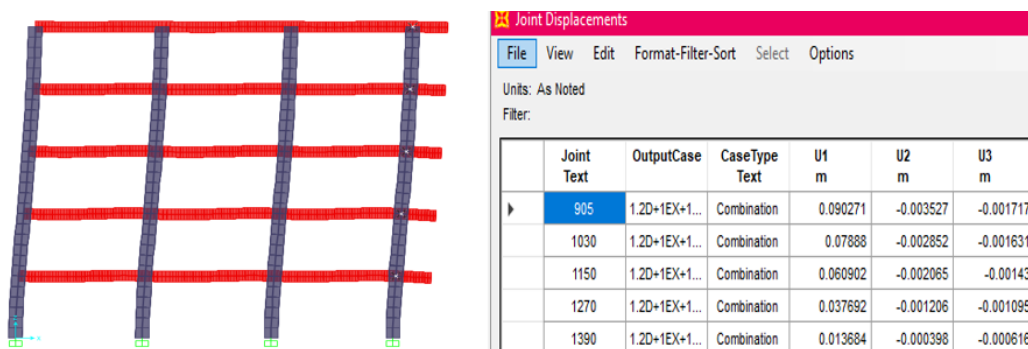


Figura 99. Derivas totales para el pórtico C, Condiciones Finales. *Fuente.* Elaboración propia en SAP 2000.

A continuación, se presenta un análisis de derivas de piso teniendo en cuenta las condiciones que debe cumplir una estructura de acuerdo con la NSR-10, en análisis permite conocer cómo

se ven afectados estos desplazamientos horizontales teniendo en cuenta el fenómeno de corrosión (Ver tabla 31)

**Tabla 31.**

*Análisis de derivas, condiciones iniciales y finales en cuanto al efecto de la corrosión.*

Deriva de piso Condiciones Normales								
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.01351	-0.00039	0.01351	-0.00039	0.01352	2.87500	0.4703%	Si cumple
Piso 2	0.03723	-0.00119	0.02371	-0.00080	0.02372	2.87500	0.8252%	Si cumple
Piso 3	0.06015	-0.00204	0.02292	-0.00085	0.02294	2.87500	0.7978%	Si cumple
Piso 4	0.07790	-0.00282	0.01776	-0.00078	0.01777	2.87500	0.6182%	Si cumple
Piso 5	0.08915	-0.00348	0.01125	-0.00067	0.01127	2.87500	0.3920%	Si cumple
Deriva de piso Después de la afectación por corrosión								
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.01368	-0.00040	0.01368	-0.00040	0.01369	2.875	0.4762%	Si cumple
Piso 2	0.03769	-0.00121	0.02401	-0.00081	0.02402	2.875	0.8355%	Si cumple
Piso 3	0.06090	-0.00207	0.02321	-0.00086	0.02323	2.875	0.8079%	Si cumple
Piso 4	0.07888	-0.00285	0.01798	-0.00079	0.01800	2.875	0.6259%	Si cumple
Piso 5	0.09027	-0.00353	0.01139	-0.00068	0.01141	2.875	0.3969%	Si cumple

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta un análisis comparativo en cuanto a la diferencia porcentual entre las derivas de piso en condiciones iniciales y finales (Ver Tabla 32)

**Tabla 32.**

*Error relativo porcentual de derivas de pisos, condiciones Iniciales y Finales considerando la corrosión.*

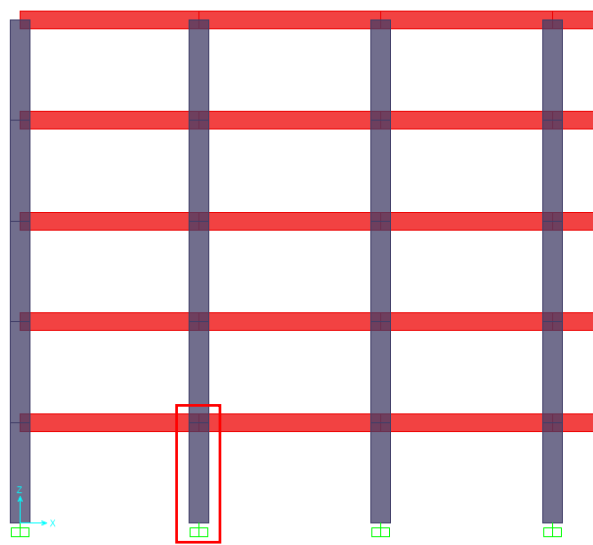
Comparación Análisis de Derivas			
Piso	$\alpha$ piso (Inicial)	$\alpha$ piso(Final)	Diferencia%
Piso 1	0.470%	0.476%	1.26%
Piso 2	0.825%	0.836%	1.25%
Piso 3	0.798%	0.808%	1.26%
Piso 4	0.618%	0.626%	1.26%
Piso 5	0.392%	0.397%	1.25%

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.



## 8.2. Análisis Diagramas de iteración de columnas considerando el fenómeno de la corrosión.

A continuación, se presenta diagramas de iteración de una columna seleccionada de la estructura, este análisis permite ver las diferencias en cuanto a resistencia de elementos verticales en condiciones normales y cuando se da la afectación por corrosión. la figura 100 muestra la columna seleccionada, perteneciente al pórtico C.



**Figura 100.** Pórtico C Columna más crítica, para análisis en SAP 2000. **Fuente:** Elaboración propia.

En las figuras 87,88,89 y 90 encontramos los diagramas de iteración de diseño y nominal para la columna seleccionada en condiciones normales, es decir, sin cambios producto de la corrosión.

A continuación, se presentan diagramas de iteración nominal y de diseño de la columna definida cuando se presentan modificaciones productos de la corrosión, (Ver figuras 101, 102, 103 y 104).

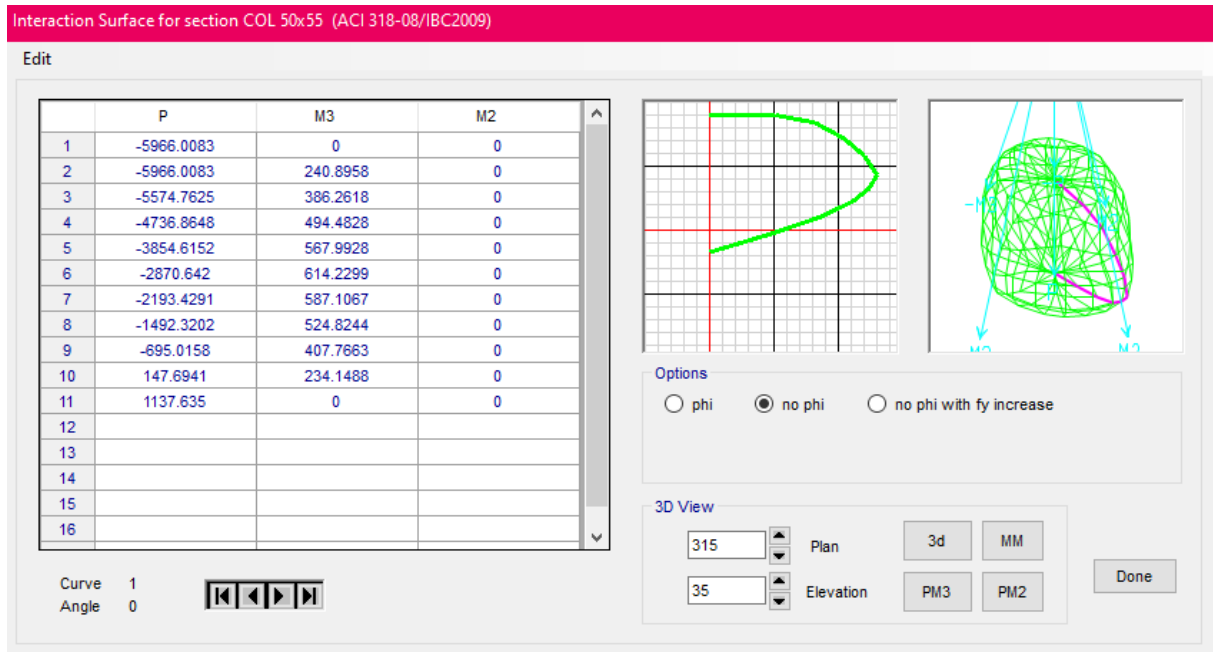


Figura 101. Valores y diagrama de iteración nominal en condiciones de corrosión del elemento con  $P_u$  y  $M_y$ , Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000 20.

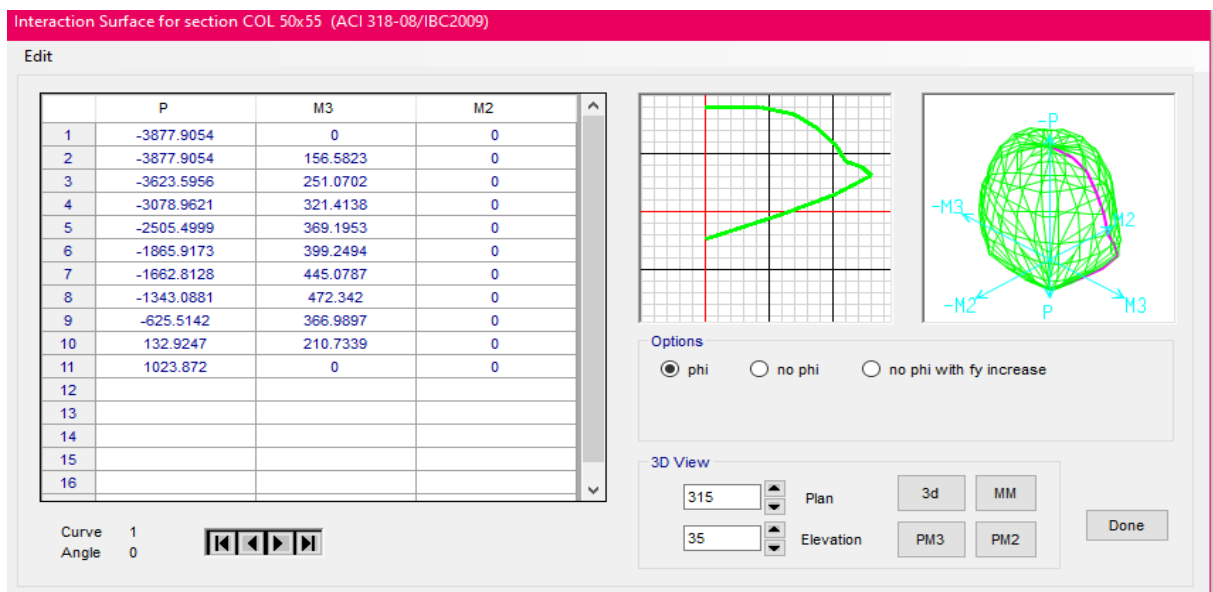
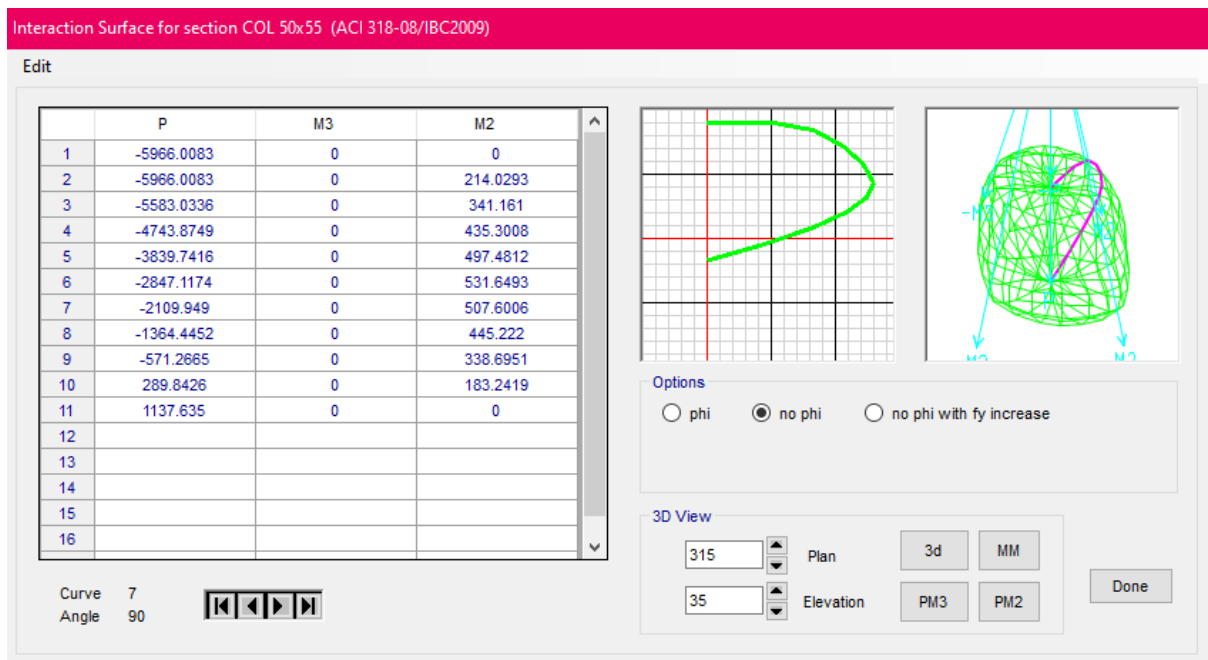
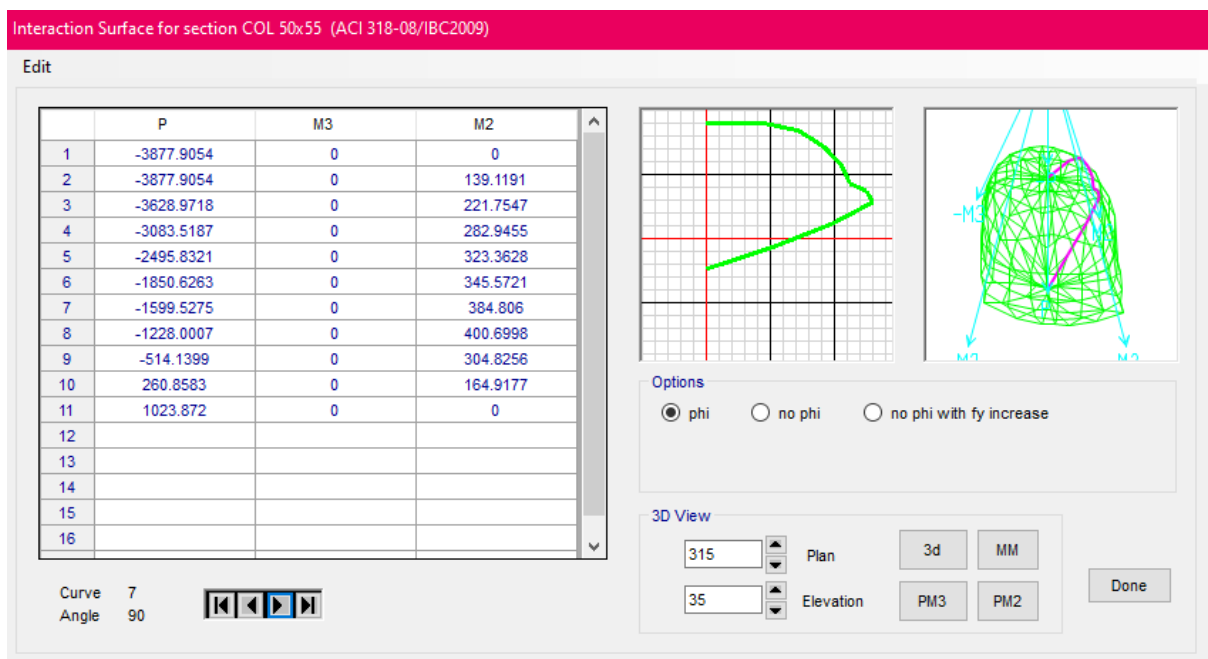


Figura 102. Valores y diagrama de iteración de diseño en condiciones de corrosión del elemento con  $P_u$  y  $M_y$ , Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000 20.



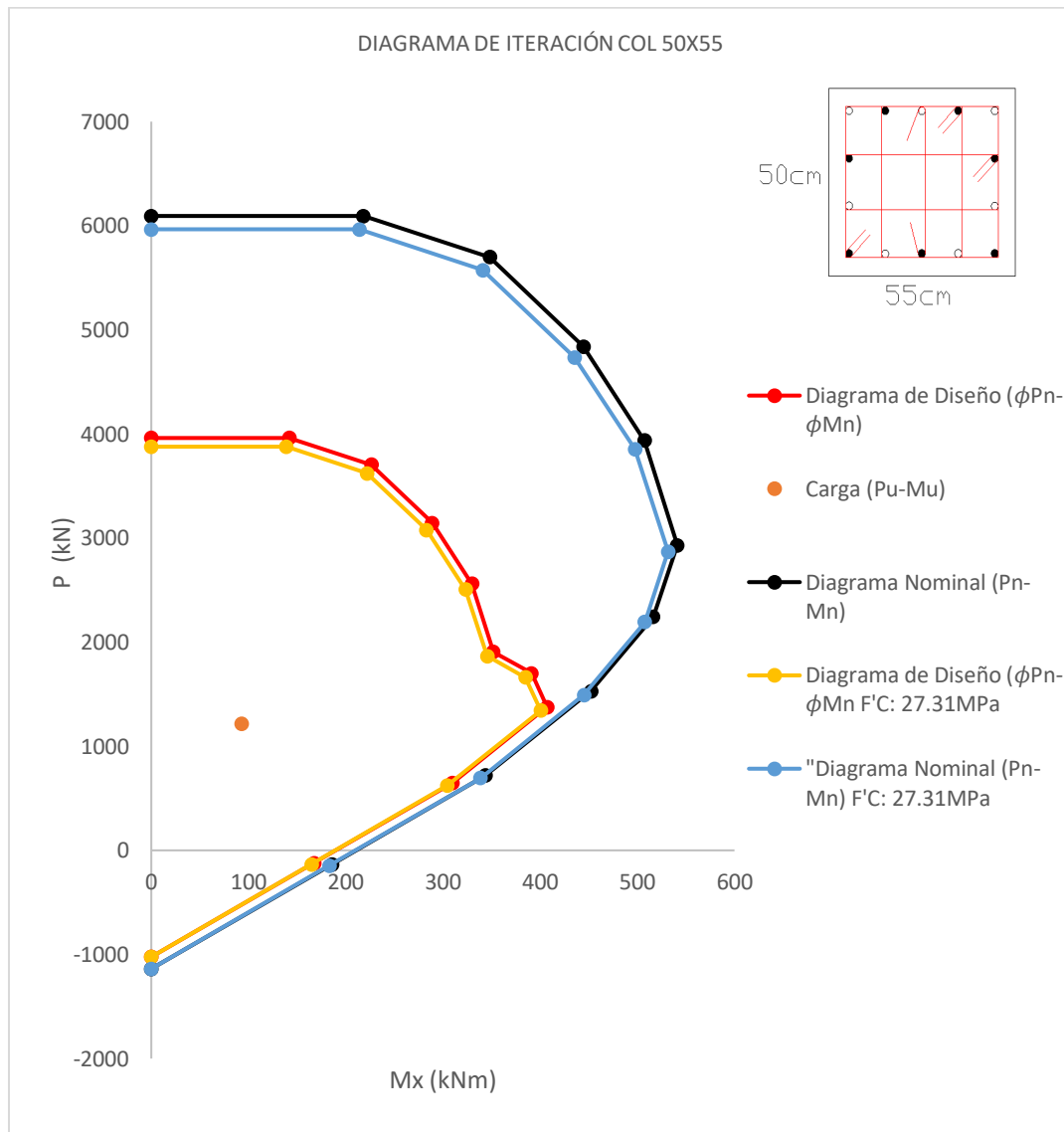
**Figura 103.** Valores y diagrama de iteración nominal en condiciones de corrosión del elemento con  $P_u$  y  $M_x$ ,  
**Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.



**Figura 104.** Valores y diagrama de iteración de diseño en condiciones de corrosión del elemento con  $P_u$  y  $M_x$ ,  
**Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación se presenta diagramas de iteración nominal y de diseño de la columna seleccionada en el portico C, Se presenta la condición inicial(Sin corrosión) y condiciones

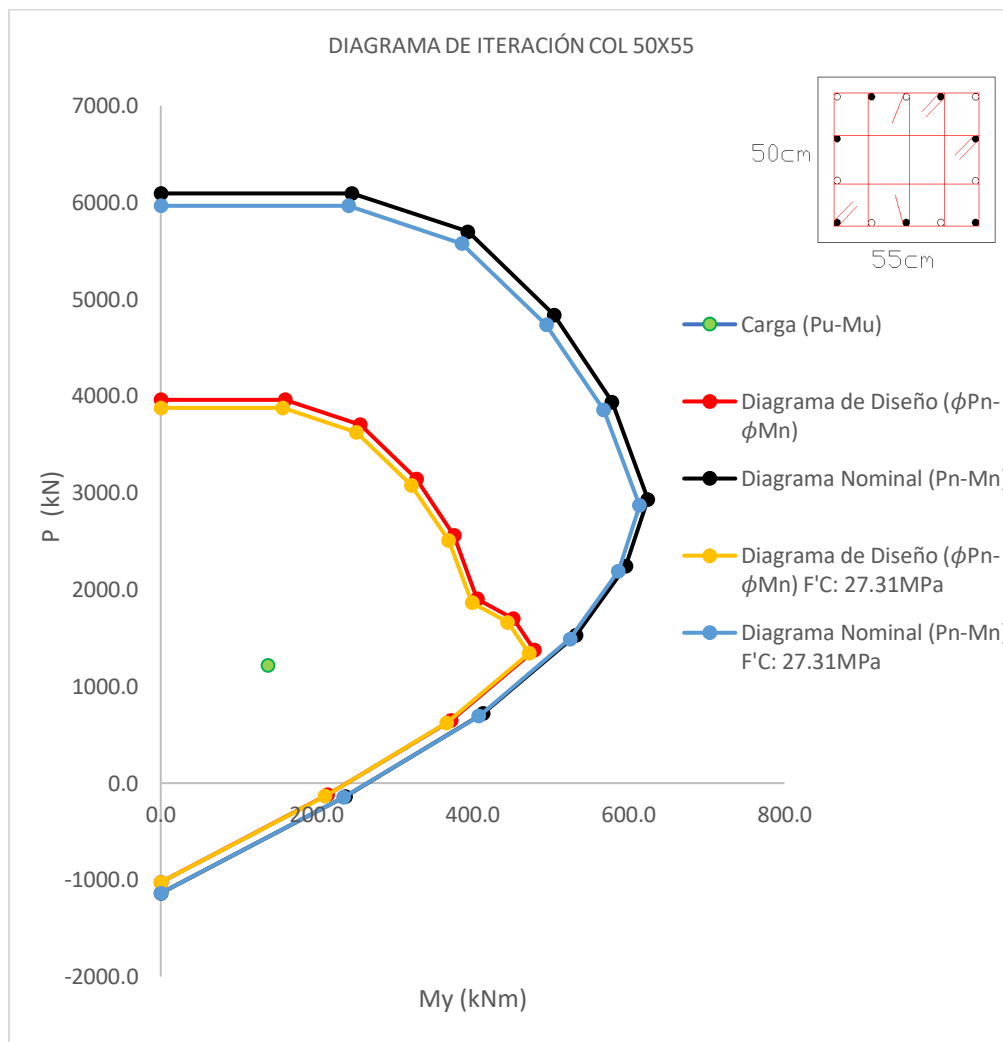
finales(Con corrosión), se presenta los puntos de las cargas ultimas combinadas que llegan a la columna de lo cual se puede apreciar que el elemento resiste las solicitaciones aplicadas para ambas condiciones, la figura 105 muestra el diagrama de iteracion con momento en direccion X y se grafica el punto critico  $P_u=1217.2\text{kN}$  y  $M_2=M_{Ux}=93.02\text{kNm}$



**Figura 105.** Diagrama de iteración nominal y de diseño (condición inicial y final) con  $P_u$  y  $M_x$ , ubicando el punto crítico. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

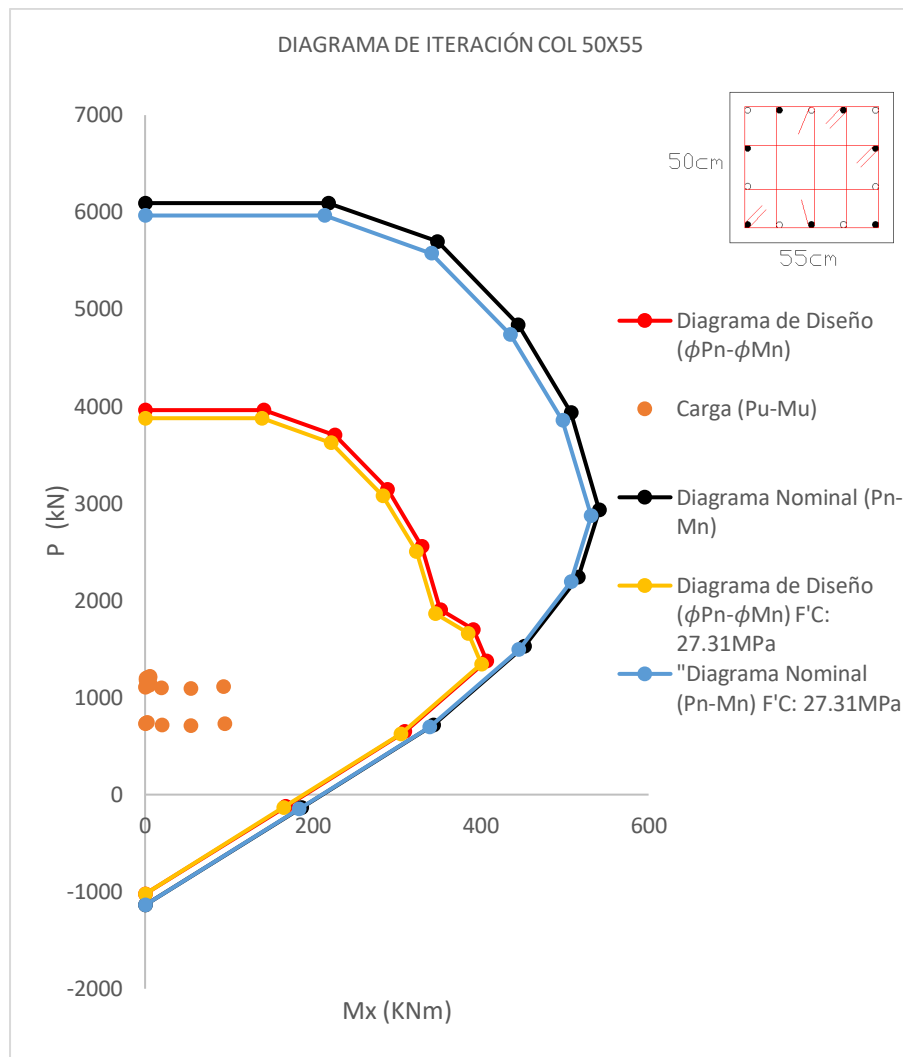
A continuación, la figura 106 muestra el diagrama de iteracion nominal y de diseño con momento en direccion Y, Se presenta la condicion inicial (Sin corrosion) y condiciones

finales (Con corrosión), se grafica el punto crítico  $P_u=1217.2\text{kN}$  y  $M_3=M_{Uy}=137.45\text{kN.m}$ , la columna resiste.



**Figura 106.** Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con  $P_u$  y  $M_y$ , ubicando el punto crítico. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación, la figura 107 muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección X, Se presenta la condición inicial (Sin corrosión) y condiciones finales (Con corrosión), se muestra de todas las combinaciones de cargas utilizadas en diseño  $P_u$  y  $M_{Ux}$ , la columna resiste.



**Figura 107.** Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con  $P_u$  y  $M_x$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. **Fuente:** Elaboración propia, En SAP 2000 20.

A continuación, la **figura 108** muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección Y, Se presenta la condición inicial (Sin corrosión) y condiciones finales (Con corrosión). se muestra de todas las combinaciones de cargas utilizadas en diseño  $P_u$  y  $M_{Uy}$ , la columna resiste.

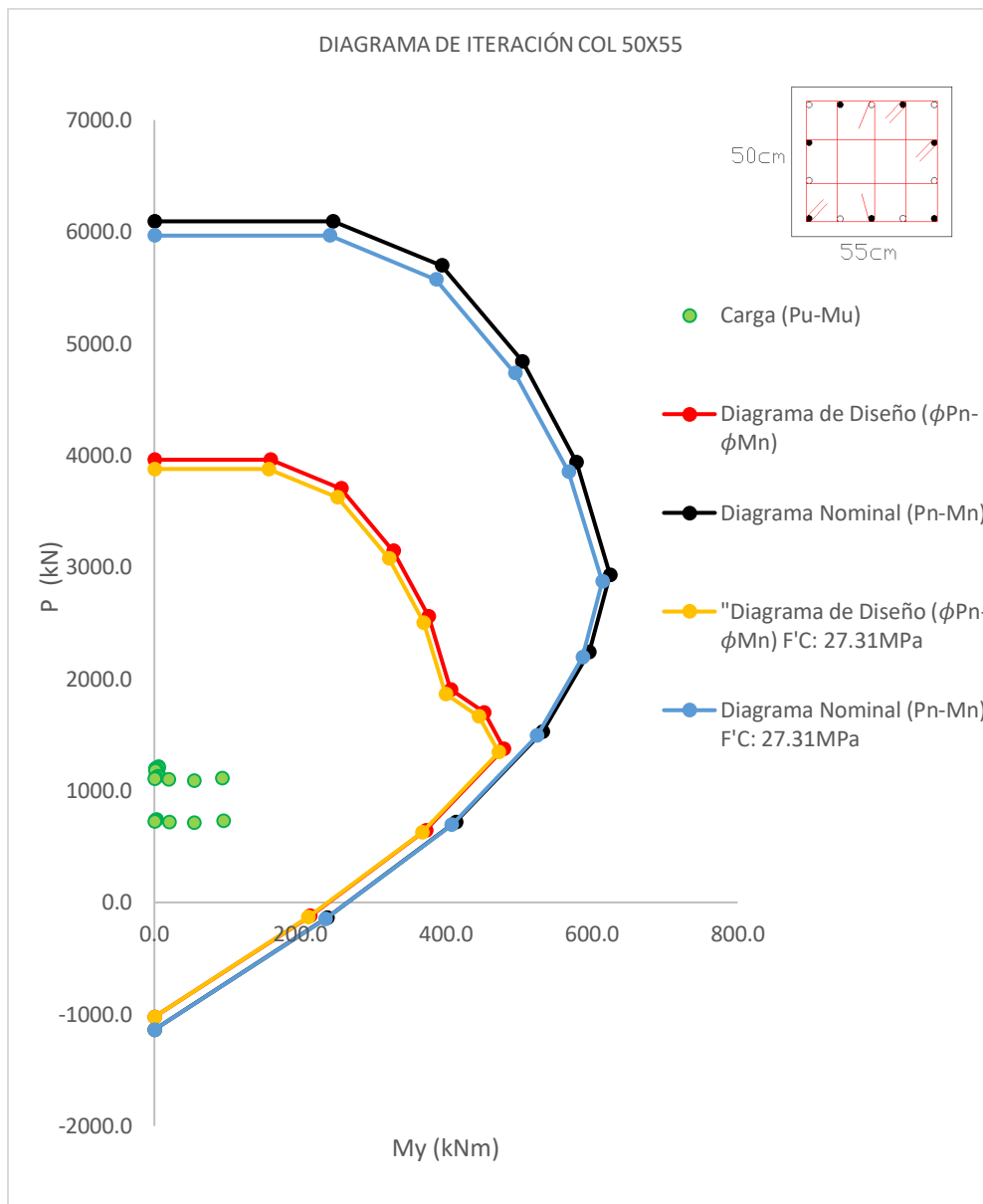
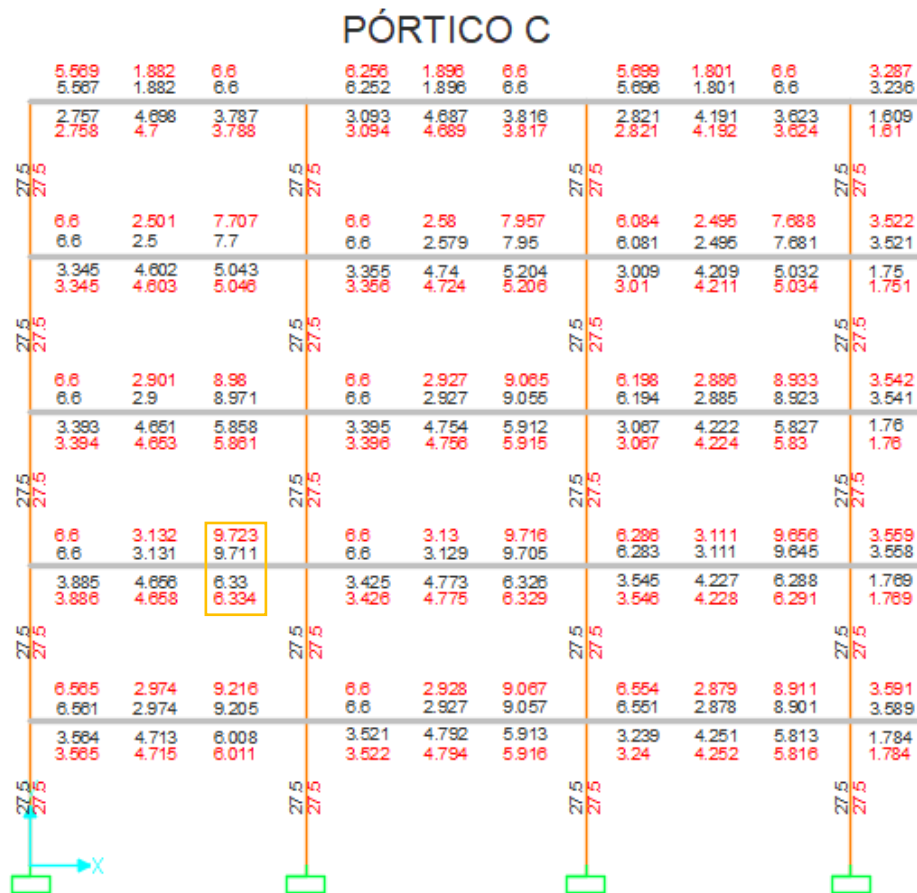


Figura 108. Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con  $P_u$  y  $M_y$ , ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000 20.

### 8.3. Análisis en la variación de los resultados de diseño a flexión de vigas y flexo-compresión de elementos verticales.

Con el fin de conocer la variación que se puede presentar en los resultados de los diseños estructurales de esta investigación, se realiza una modelación cambiando la resistencia a la compresión de diseño por la obtenida del análisis por corrosión  $f'_c$ : 27.31 MPa. A continuación, se muestra un pórtico con los resultados, los valores que se muestran

corresponden al área de acero requerida por cada elemento  $A_s$ , los números de color negro son los correspondiente al diseño en condiciones normales y los números de color rojo corresponden a los resultados del diseño en condiciones de corrosión, es decir, se modifica  $f'c$  (Ver figura 109).



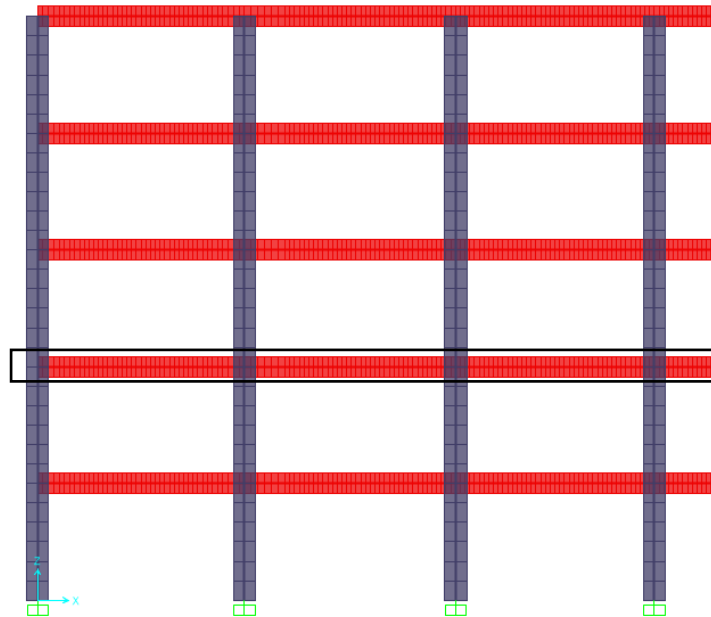
**Figura 109.** Diseño a flexión y flexocompresión de elementos estructurales, condiciones Iniciales y finales.  
**Fuente:** elaboración propia en SAP2000 20

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 109 se puede decir que, la variación presentada en cuanto a cuantía requerida del acero para condiciones iniciales y finales es relativamente baja, la mayor diferencia encontrada es de  $9.723\text{cm}^2 - 9.711\text{cm}^2 = 0.012\text{cm}^2$ , lo cual corresponde a una diferencia de un 0.12%, este porcentaje se obtiene utilizando los valores que se muestran seleccionados en la figura 109



#### 8.4. Comparación entre la capacidad de resistencia de vigas en condiciones normales y considerando el fenómeno de corrosión.

A continuación, se presenta el elemento de estudio, una viga diseñada que cumple con la normativa colombiana NSR-10, el elemento se ubica en el pórtico C como se muestra en la figura 110.



**Figura 110.** Pórtico C Viga Crítica seleccionada, análisis en SAP 2000. **Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se presenta el resultado de diseño de la viga seleccionada, se muestra la cuantía de refuerzo y el despiece detallado de la viga (Ver figura 111). Importante resaltar que el elemento de estudio es el que presenta la condición más crítica en la estructura, por lo cual, es el elemento que ha requerido mayor cuantía de refuerzo por esfuerzos a flexión.

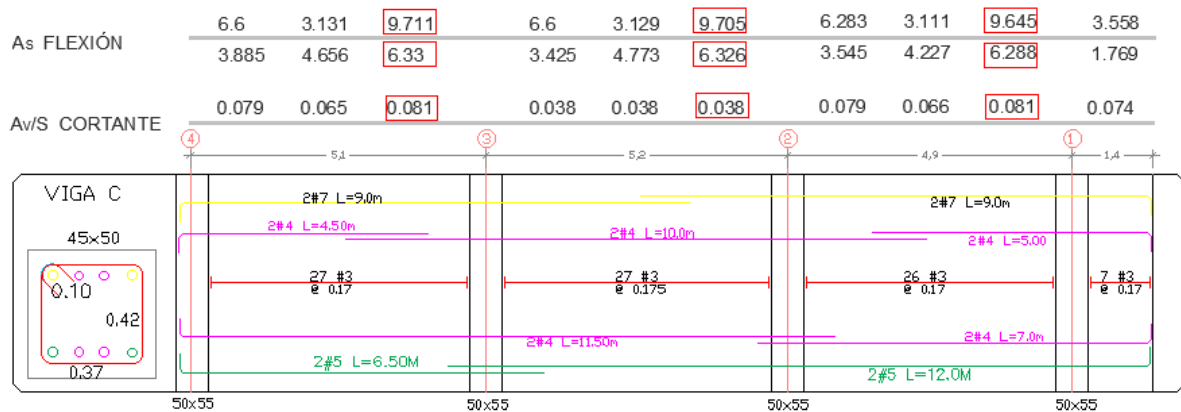


Figura 111. Diseño y despiece de Viga tipo C. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza el cálculo de la capacidad de resistencia de sección del elemento, considerando dos escenarios, el primero es donde elemento conserva las condiciones de diseño (Resistencia de concreto y cuantía de refuerzo) iniciales y el segundo escenario es aplicando es considerando los efectos producidos por la corrosión en La edificación.

### Materiales

Concreto  $f'_c$ : 28MPa

Acero: 2#7 y 2#4

#### 8.4.1. Cálculo de Capacidad de la sección en condiciones iniciales.

A continuación, se presenta el cálculo de la capacidad de resistencia del elemento viga considerando las condiciones normales de diseño.

- **Cálculo del valor d:** Distancia desde la fibra extrema a compresión hasta el centroide del refuerzo sometido a tracción.

$$d = h (\text{Altura sección}) - d'$$

$$d' = r(\text{recubrimiento}) + \Phi e(\text{Estribo}) + \frac{\Phi b(\text{Barra acero})}{2}$$

$$d' = 4cm + 0.95cm + \frac{2.22cm + 1.27cm}{2}$$

$$d' = 5.826cm$$

$$d = 50cm - 5.826cm$$

$$d = 44.17cm$$

▪ **Cálculo de la cuantía del elemento.**

$$As = 2\#7 \text{ y } 2\#4$$

$$As = 2(3.87cm^2) + 2(1.29cm^2)$$

$$As = 10.293cm^2$$

$$\rho = \frac{As}{bd}$$

$$\rho = \frac{10.293cm^2}{45cm \times 44.17cm}$$

$$\rho = 0.0051777$$

▪ **Chequeo de cuantía**

$$\rho_{min} < \rho_{real} < \rho_{max}$$

$$0.003333 < 0.0051777 < 0.0178 \text{ ----- Ok}$$

▪ **Cálculo del momento de resistencia de la sección.**

$$a = \frac{AsFy}{0.85f'cb} \text{ (Ecuación. 26)}$$

$$a = \frac{0.001032 m^2 * 420 mPa}{0.85 * 28 mPa * 0.45 m}$$

$$a = 0.040363m$$

$$Mni = AsFy \left( d - \frac{a}{2} \right) \text{ (Ecuación. 27)}$$

$$Mni = 0.0010293 m^2 * 420 mPa \left( 0.4417 m - \frac{0.040363}{2} \right) * 1000$$

$$Mni = 182.235 kN.m$$

**8.4.2. Chequeo de Capacidad de la sección Considerando los cambios por corrosión.****Materiales**

Concreto  $f'c$ : 27.31MPa

Cuantía Acero Inicial  $\rho = 0.0051777$  Descontando el 2.37%

Cuantía Acero Final  $\rho = 0.0050550$

- **Cálculo del valor  $d$ :** distancia desde la fibra extrema a compresión hasta el centroide del refuerzo sometido a tracción.

$$d = h \text{ (Altura sección)} - d'$$

$$d' = r(\text{recubrimiento}) + \Phi e(\text{Estribo}) + \frac{\Phi b(\text{Barra acero})}{2}$$

$$d' = 4\text{cm} + 0.95\text{cm} + \frac{\frac{2.22\text{cm} + 1.27\text{cm}}{2}}{2}$$

$$d' = 5.826\text{cm}$$

$$d = 50\text{cm} - 5.82\text{cm}$$

$$d = 44.17\text{cm}$$

- **Cálculo de  $S_a$ .**

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

$$S_a = A_s b d$$

$$S_a = 0.0050550 (45\text{cm})(44.17\text{cm})$$

$$S_a = 10.049\text{cm}^2$$

- **Cálculo del momento de resistencia de la sección.**

$$a = \frac{A_s F_y}{0.85 f'c b} \text{ (Ecuación. 26)}$$

$$a = \frac{0.001049 \text{ m}^2 * 420 \text{ mPa}}{0.85 * 27.31 \text{ mPa} * 0.45 \text{ m}}$$

$$a = 0.040402$$

$$M_n f = A_s F_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \text{ (Ecuación. 27)}$$

$$M_n f = 0.0010049 \text{ m}^2 * 420 \text{ mPa} \left( 0.4417 \text{ m} - \frac{0.040402}{2} \right) * 1000$$

$$M_n f = 177.908 \text{ kN.m}$$

A continuación, se presenta un resumen con los resultados del cálculo de la capacidad de resistencia a la flexión  $M_n$ , para las condiciones iniciales (Sin corrosión) y finales (con corrosión) que podría presentar la estructura de acuerdo con los estudios realizados en esta investigación. Para el cálculo de  $M_n(\text{Inicial})$  y  $M_n(\text{Final})$  se utiliza el mismo procedimiento descrito anteriormente para la viga tipo C. (Ver tabla 33).

**Tabla 33.**

*Resultados de cálculos de  $M_n(\text{Inicial})$  y  $M_n(\text{Final})$  para vigas Tipo que conforman la estructura.*

Elemento	F'C (Inicial)	F'C (Final)	$\rho(\text{Inicial})$	$\rho(\text{Final})$	$M_n(\text{Inicial})$	$M_n(\text{Final})$	Er%
Viga D y A	28MPa	27.31MPa	0.00413	0.00404	147.46	143.96	2.3736%
Viga C y B	28MPa	27.31MPa	0.00518	0.00506	182.24	177.91	2.3745%
Viga 1 2 3 y 4	28MPa	27.31MPa	0.00330	0.00318	117.41	114.63	2.3728%
Vigueta 1	28MPa	27.31MPa	0.00481	0.00470	27.26	26.61	2.3742%

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

De los resultados mostrados en la tabla 33 se puede decir que, la resistencia nominal de la sección de elementos tipo viga se reduce en promedio un 2.37% considerando la disminución de la resistencia a la compresión del concreto y la disminución de cuantía de refuerzo en condiciones de corrosión para este estudio de caso.

## **9. Efectos de la corrosión desde el punto de vista estructural recubrimiento $r=1\text{cm}$ .**

Teniendo en cuenta los resultados de la modelación considerando el fenómeno de corrosión para la estructura de estudio de caso diseñada cumpliendo con todos los requisitos estipulados en la NSR-10, se puede analizar que los cambios debido a este fenómeno desde el punto de vista estructural no generan una alta afectación a la edificación, por ejemplo; el valor máximo de cuantía de refuerzo longitudinal requerida en vigas cuando se aplica corrosión

solo aumenta un 0.12%, los diagramas de iteración muestran una baja disminución de la capacidad de resistencia de columnas. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario realizar una modelación en este caso No cumpliendo con el requisito de recubrimiento mínimo para la estructura según la NSR-10 para conocer cómo se comporta la estructura. A continuación, se muestran los resultados de una modelación considerando que la estructura tiene un recubrimiento de concreto al estribo de 1cm, lo cual genera un aumento en el grado de corrosión para el estudio de caso.

La tabla 34 muestra el resultado del análisis por corrosión para un periodo de 50 años considerando que los elementos estructurales tienen recubrimiento al estribo de 1cm.

**Tabla 34.**

*Grado de corrosión de la estructura, periodo de 50 años y R: 1cm*

GRADO DE CORROSIÓN					
Rec. (cm)	Porosidad del concreto(%)	Ambiente marino	icorr( $\mu\text{m}/\text{Año}$ )	icorr ( $\mu\text{m}/\text{Año}$ )	Grado de corrosión
1	11.91	SI	4.9	56.84	23.20%

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, utilizando la ecuación #5 se calcula la disminución de resistencia a la compresión del concreto  $F'C$ , Considerando el grado de corrosión que se obtiene del análisis por corrosión.

$$\downarrow F'C(\%) = 0.7964 NC(\%) + 0.5574 \quad (\text{Ecuación. 5})$$

$$\downarrow F'C(\%) = 0.7964 (23.2) + 0.5574$$

$$\downarrow F'C(\%) = 19\%$$

$$F'C (\text{Final})=22.68 \text{ MPa}$$

De acuerdo con el análisis por corrosión, para el estudio de caso estructura aporricada con recubrimiento de elementos estructurales de 1cm. La resistencia a la compresión del concreto disminuye 19%, por lo cual, la resistencia a la compresión final sería de 22.68MPa, por lo tanto, el módulo de elasticidad final también se modifica dando como resultado 22383056KPa. La Figura 112 presenta las modificaciones realizadas en SAP 2000 para la nueva modelación estructural.

**Figura 112.** Modificaciones de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto en SAP 2000.  
**Fuente:** elaboración propia en SAP2000.

A continuación, se presenta diferentes análisis para comparar el comportamiento de la estructura modelada inicialmente y la modelación considerando los cambios por corrosión para la estructura con recubrimiento al estribo de 1cm. Se estudia el comportamiento de derivas, diagramas de iteración de columnas, cuantías de diseño y capacidad de resistencia de secciones de vigas.

### 9.2. Análisis de derivas considerando el cambio producto de la corrosión para estructura con recubrimientos de 1cm.

Considerando la modificación realizada en la resistencia a la compresión se realiza el análisis de derivas comparando con las condiciones iniciales. A continuación, se muestra los resultados del análisis de derivas antes y después de aplicar los cambios por corrosión, utilizando la combinación 1.2D+1EX+1L para el pórtico C (Ver tabla 35).

**Tabla 35.**

*Análisis de derivas, condiciones iniciales y finales por afectaciones de la corrosión.*

Deriva de piso Condiciones Normales								
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.01351	-0.00039	0.01351	-0.00039	0.01352	2.87500	0.4703%	Si cumple
Piso 2	0.03723	-0.00119	0.02371	-0.00080	0.02372	2.87500	0.8252%	Si cumple
Piso 3	0.06015	-0.00204	0.02292	-0.00085	0.02294	2.87500	0.7978%	Si cumple
Piso 4	0.07790	-0.00282	0.01776	-0.00078	0.01777	2.87500	0.6182%	Si cumple
Piso 5	0.08915	-0.00348	0.01125	-0.00067	0.01127	2.87500	0.3920%	Si cumple
Deriva de piso después de la afectación por corrosión (R: 1cm)								
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10
Piso 1	0.01502	-0.00044	0.01502	-0.00044	0.01502	2.875	0.5225%	Si cumple
Piso 2	0.04136	-0.00132	0.02635	-0.00089	0.02636	2.875	0.9169%	Si cumple
Piso 3	0.06683	-0.00227	0.02547	-0.00094	0.02549	2.875	0.8865%	Si cumple
Piso 4	0.08656	-0.00313	0.01973	-0.00086	0.01975	2.875	0.6868%	Si cumple
Piso 5	0.09906	-0.00387	0.01250	-0.00074	0.01252	2.875	0.4355%	Si cumple

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

A continuación, se presenta un análisis comparativo en cuanto a la diferencia porcentual entre las derivas de piso en condiciones iniciales y finales (Ver Tabla 36)

**Tabla 36.**

*Error relativo porcentual de derivas de pisos, condiciones Iniciales y Finales considerando la corrosión.*

Comparación Análisis de Derivas			
Piso	$\alpha$ piso (Inicial)	$\alpha$ piso(Final)	Er%
Piso 1	0.470%	0.523%	11.11%

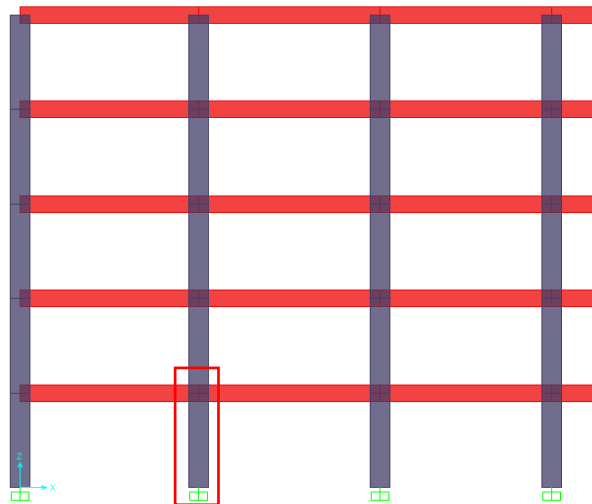


Piso 2	0.825%	0.917%	11.11%
Piso 3	0.798%	0.886%	11.11%
Piso 4	0.618%	0.687%	11.11%
Piso 5	0.392%	0.436%	11.11%

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

### 9.3. Análisis Diagramas de iteración de columnas considerando el fenómeno de la corrosión y recubrimiento al estribo de 1cm.

A continuación, se presenta diagramas de iteración de una columna seleccionada de la estructura, este análisis permite ver las diferencias en cuanto a resistencia de elementos verticales en condiciones iniciales y cuando se da la afectación por corrosión. la figura 113 muestra la columna seleccionada, perteneciente al pórtico C.



**Figura 113.** Pórtico C Columna más crítica, para análisis en SAP 2000. *Fuente:* Elaboración propia.

A continuación, la **figura 114** muestra el diagrama de iteración nominal y de diseño con momento en dirección Y, Se presenta la condición inicial (Sin corrosión) y condiciones finales (Con corrosión) y recubrimiento al estribo de 1cm. Se muestra de todas las combinaciones de cargas utilizadas en diseño  $P_u$  y  $M_{Uy}$ , la columna resiste.

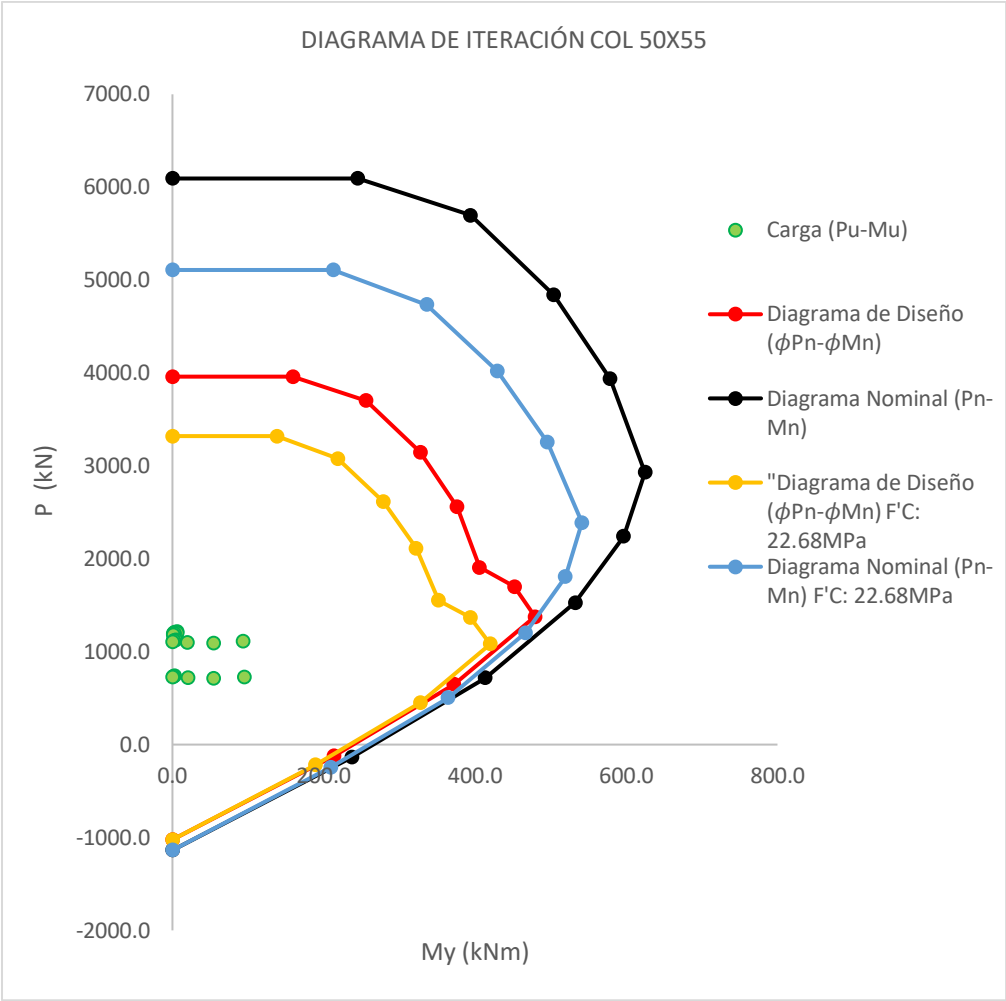
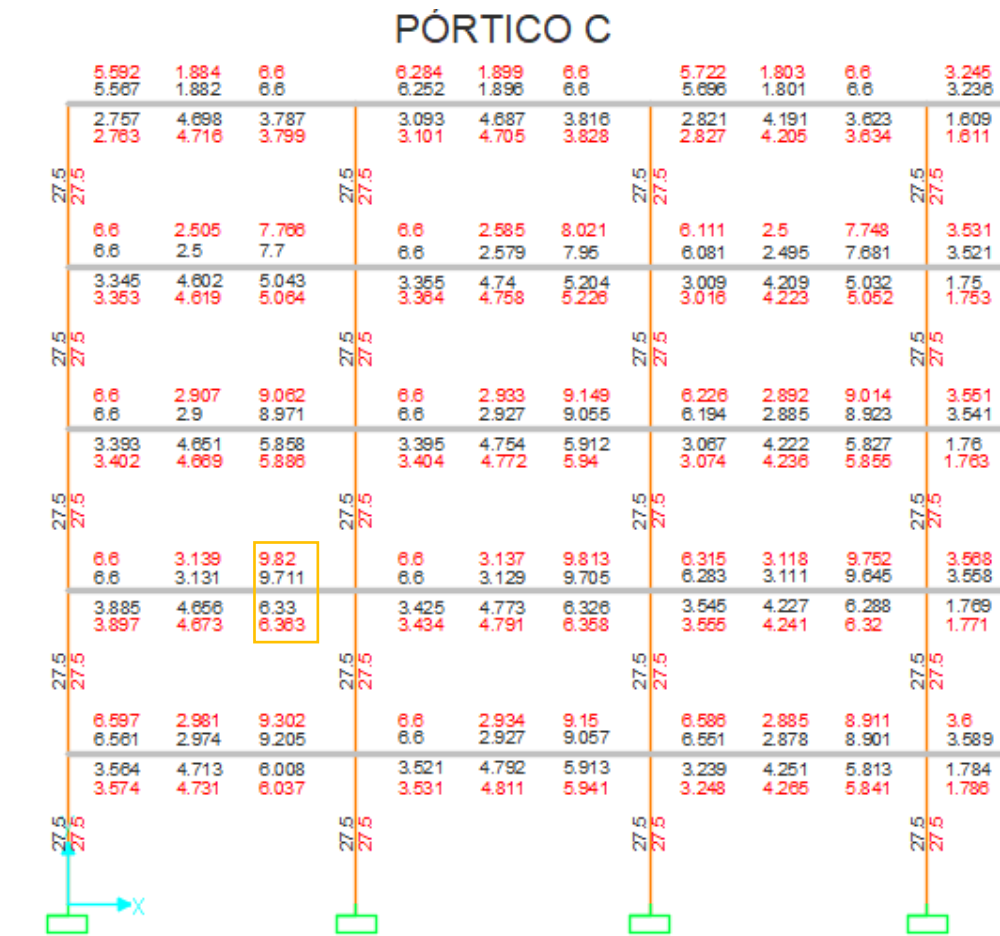


Figura 114. Diagrama de iteración nominal y de diseño (Condición inicial y final) con Pu y My, ubicando las combinaciones de cargas que puede experimentar la estructura. Fuente: Elaboración propia, En SAP 2000 20.

9.4. Análisis de diseño a flexión y flexo-compresión, considerando Recubrimiento R=1cm.

Con el fin de conocer la variación que se puede presentar en los resultados de los diseños por efectos de corrosión y poco recubrimiento R:1cm, se realiza una modelación cambiando la resistencia a la compresión de diseño por la obtenida del análisis por corrosión f'c: 22.68 MPa. A continuación, se muestra el pórtico C con los resultados, los valores que se muestran corresponden al área de acero requerida por cada elemento As, los números de color negro son los correspondiente al diseño en condiciones Iniciales y los números de color rojo

corresponden a los resultados del diseño en condiciones de corrosión, es decir, se modifica  $f'c$  (Ver figura 115).



**Figura 115.** Diseño a flexión y flexocompresión de elementos estructurales, condiciones Iniciales y finales.  
**Fuente:** elaboración propia en SAP2000 20

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 115 se puede decir que, la variación presentada en cuanto a cuantía requerida del acero para condiciones iniciales y finales es relativamente considerable, la mayor diferencia encontrada es de 9.82cm-9.711cm<sup>2</sup>=0.11cm<sup>2</sup>, lo cual corresponde a una diferencia de un 1.12%, este porcentaje se obtiene utilizando los valores que se muestran seleccionados en la figura 115

**9.5. Análisis de capacidad de resistencia de vigas considerando la corrosión y R=1cm.**

A continuación, se presenta un resumen con los resultados del cálculo de la capacidad de resistencia a la flexión  $M_n$ , para las condiciones iniciales (Sin corrosión) y finales (con corrosión con R: 1cm) que podría presentar la estructura de acuerdo con los estudios realizados en esta investigación. Para el cálculo de  $M_n(\text{Inicial})$  y  $M_n(\text{Final})$  se utiliza el mismo procedimiento descrito en el inciso 8.4 de esta investigación (Ver tabla 37).

**Tabla 37.**

*Resultados de cálculos de  $M_n(\text{Inicial})$  y  $M_n(\text{Final})$  para vigas Tipo que conforman la estructura.*

Elemento	F'C (Inicial)	F'C (Final)	$\rho(\text{Inicial})$	$\rho(\text{Final})$	$M_n(\text{Inicial})$	$M_n(\text{Final})$	Er%
Viga D y A	28MPa	22.68MPa	0.0041	0.0039	147.46	139.52	5.38%
Viga C y B	28MPa	22.68MPa	0.0052	0.0049	182.24	172.12	5.55%
Viga 1 2 3 y 4	28MPa	22.68MPa	0.0033	0.0031	117.41	111.25	5.25%
Vigueta 1	28MPa	22.68MPa	0.0048	0.0046	27.27	25.77	5.49%

*Nota. Fuente:* elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

De los resultados mostrados en la tabla 33 se puede decir que, la resistencia nominal de la sección de elementos tipo viga se reduce en promedio un 5.41% considerando la disminución de la resistencia a la compresión del concreto con R: 1cm y la disminución de cuantía de refuerzo en condiciones de corrosión para este estudio de caso.

## 10. Conclusiones

En este trabajo se analizó el comportamiento de una estructura aporricada convencional afectada por el fenómeno de la corrosión. a partir de la cual se puede concluir lo siguiente:

- Para una estructura a porticada convencional que cumple todos los requisitos de diseño de la NSR-10, ubicada en la ciudad de santa marta, considerando variables ambientales (Salinidad) y propias de la estructura (Resistencia, recubrimiento, porosidad de concreto) la velocidad de corrosión a la cual estaría expuesta la edificación es de  $5.8 \frac{\mu m}{Año}$ . Por otra parte, considerando que no se cumple requisitos mínimos de recubrimiento de elementos estructurales, tomando  $R=1\text{cm}$  se obtiene para este estudio de caso una intensidad de corrosión  $56.84 \frac{\mu m}{Año}$ .
- Se obtuvo una correlación empírica de un análisis exhaustivo de la literatura, que expresa el grado de corrosión en términos de pérdidas de masa del acero embebido en concreto en relación con la resistencia a la compresión del concreto. Para este estudio de caso cumpliendo con todos los requisitos de análisis y diseño de la NSR-10 presentaría un 2.37% de corrosión y un 2.45% de perdida de resistencia a la compresión F'C. Por otra parte, considerando que el recubrimiento no cumple los requisitos de la NSR-10 con un valor de  $R=1\text{cm}$  se obtiene grado de corrosión del 23.20% y una disminución de F'C del 19%.
- Los desplazamientos horizontales analizados en las estructuras podrían sufrir alteraciones por efectos de corrosión, para este estudio de caso las derivas de piso en condiciones de corrosión en la estructura y cumpliendo con todos los requisitos de análisis y diseño de la NSR-10 aumentan en un 1.255% en comparación con las condiciones iniciales de la edificación. Por otro lado, considerando que el recubrimiento no cumple los

requisitos de la NSR-10 con un valor de  $R=1\text{cm}$  se obtiene que en promedio las derivas de piso aumentan un 11.11% en comparación con las condiciones iniciales de la estructura.

- Se puede presentar variación en cuanto a cuantía de acero longitudinal requerida de los elementos de la estructura en estudio. Para este caso particular la cuantía de acero requerido es mayor en condiciones de corrosión de la estructura, cumpliendo con los requisitos de análisis y diseño de la NSR-10 se presenta un aumento hasta de 0.12% de cuantía. Por otro lado, considerando que el recubrimiento no cumple los requisitos de la NSR-10 con un valor de  $R=1\text{cm}$  se obtiene un aumento en la cuantía requerida hasta del 1.12%.

- Finalmente, Para este estudio de caso, considerando los efectos de la corrosión y cumpliendo con los requisitos de análisis y diseño de la NSR-10 la resistencia nominal de la sección de elementos tipo viga se reduce en promedio un 2.37%. Por otra parte, considerando que el recubrimiento no cumple los requisitos de la NSR-10 con un valor de  $R=1\text{cm}$  se obtiene una reducción en la capacidad nominal de sección de vigas del 5.38%. En columnas los diagramas de iteración se ven afectados, se produce una reducción en la capacidad de resistencia de columnas considerando el efecto de la corrosión, pero, si no se cumple con todos los requisitos de análisis y diseño de la NSR-10 la capacidad de los elementos verticales es más desfavorable.

### **Recomendaciones.**

En esta investigación se estudió un caso particular para una edificación de concreto reforzado en la ciudad de santa mata, se determina el grado de corrosión considerando variables como; el medio ambiente, salinidad, recubrimiento de concreto, porosidad del concreto y se analiza los efectos de ese fenómeno desde el punto de vista estructural. Con el fin de generar un estudio más generalizado que permita conocer la afectación que podría sufrir una estructura cualquiera por efectos de la corrosión, se recomienda ampliar el alcance de la investigación, incluyendo otras variables que también pueden verse involucradas en el proceso de corrosión como; la carbonatación, los cambios repentinos de temperatura, la humedad alta etc. Además, importante que para una futura investigación se tenga en cuenta la aplicación de ensayos de laboratorios de corrosión acelerada a probetas de concreto armado con el fin de obtener una correlación más ajustada que involucre la resistencia a la compresión y el grado de corrosión.

### Referencias

- Castañeda Valdéz, A., & Rodríguez-Rodríguez, M. (2013). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *CENIC. Ciencias Químicas*, 58.
- Di Sarno, L., & Pugliese, F. (2021). Numerical evaluation of the seismic performance of existing reinforced concrete buildings with corroded smooth rebars. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4237.
- Fernandez, I., Herrador, M., Marí, A., & Bairán, J. (2018). Ultimate Capacity of Corroded Statically Indeterminate Reinforced Concrete Members. *International Journal of Concrete*, 1-23.
- Radhi1, M., Hassan, M., & Gorgis, I. (2021). Compressive Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns. *Engineering and Technology Journal*, 1623.
- Son Vu, N., Yu, B., & Li, B. (2017). Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 474-486.
- Alcaldía Distrital de Santa Marta. (2021). *Geografía Alcaldía Distrital de Santa Marta*. Obtenido de <https://www.santamarta.gov.co/geografia>
- Angst, U., & Elsener, B. (2017). The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures. *Science Advances*, 1-8.
- ASTM C876-87. (1987). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Philadelphia, USA.
- Bastidas Salamanca, M., Ordóñez Zúñiga, S., & Ricaurte Villota, C. (2016). Eventos de intensificación y relajación del viento en la bahía de Santa Marta (Caribe Colombiano) Implicaciones Oceanográficas. *Bol. investig. mar. Costeras*, 181-196.
- Browne, R. (1992). *Durability of Building Materials*.
- Castillo Talavera, A. (2005). *Modelado del efecto de las acciones climaticas en la cantidad de agua en estado liquido del hormigon para la estimacion de la corrosion en la armadura*. Madrid: Universidad politecnica de madrid.
- Chávez Ulloa, E., Pérez López, T., Reyes Trujeque, J., & Corvo Pérez, F. (2013). Deterioro de estructuras de hormigón por carbonatación en ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 104 - 113.
- Chen, Y., Liu, P., & Yu, Z. (2018). Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength. *Materials*, 1-11.
- CSI, S. (2020). *SAP2000*. España.
- De\_la\_Cotera, M. G. (1998). *La corrosión del concreto en el ambiente marino*. .



- Di Sarno, L., & Pugliese, F. (2020). Numerical evaluation of the seismic performance of existing reinforced concrete buildings with corroded smooth rebars. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4227–4273.
- DURAR . (1997). *Manual de inspeccion evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado*. . Rio de Janeiro.
- El tiempo. (27 de 06 de 2015). No nos vamos a llenar de edificios sin ningún límite.
- Fernandez, I., Herrador, M., Marí, A., & Bairán, J. (2018). Ultimate Capacity of Corroded Statically Indeterminate Reinforced Concrete Members. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. USA: Prentice-Hall Inc.
- García López, J. D., Stand Villareal, F., Gómez Cabrera, A., & Núñez Moreno, F. A. (2016). *Comparacion de los principales sistemas constructivos VIS en colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso de estudio en Soacha*. . Bogota: Universidad Javeriana .
- Goharrokhi, A., Ahmadi, J., Shayafar, M. A., Ghanooni-Bagha, M., & Nasseradi, K. (2019). Effect of transverse reinforcement corrosion on compressive strength reduction of stirrup-confined concrete: an experimental study. *Indian Academy of Sciences*, 1-49.
- Haijun, Z., Jinlong, L., Xi, X., Yingwu, Z., & Feng, X. (2015). Experimental study of bond-slip performance of corroded reinforced concrete under cyclic loading. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Hibbeler, R. (2011). *Mecanica e materiales*. Mexico: Pearson.
- Hibbeler, R. (2012). *Analisis Estructural*. Mexico: Pearson Educacion.
- Invemar. (2001). Amenazas y Riesgos Ambientales en las Zonas Costeras Colombianas. . David A. Alonso, Martha P. Vides y Marelvis Londoño.
- Ismail, M., & Ernest Ituma , E. (2017). Effects of Climate and Corrosion on Concrete Behaviour. . 4-5.
- Jimenez Vazquez , K. E., & Lozado Ovalle, H. (2018). Analisis de la influencia de sulfatos y cloruros en el deterioro de esructuras en concreto en zonas costeras del atlantico Colombiano. (*Tesis de pregrado*). Universidad Catolica de Colombia, Bogota.
- Martin, F. M. (1996). *Degradacion y conservacion del patrimonio arquitectonico*. . España: Complutense S.A.
- Martínez, R. (2010). ¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón? *Arquitectura y Construccion* .
- Mohsen Ali, S., Mohammad Ali, B., & Ghanooni-Bagha, M. (2016). Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure. *Advances in Structural Engineering*, 897–907.

- Molera-Sola, P. (1990). *Metales Resistentes a la Corrosion*. España: Marcombo Boixareu.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Revista Construcción y Tecnología*.
- Narváez Ortega , V. (22 de Julio de 2018). Siete edificios que están en el olvido en Barranquilla.
- NSR, 2. (2010). *Relamento Colombiano Sismo Resistente*.
- Paredes, J., Prieto, J., & Santos, E. (2013). *Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: Vigas y Columnas*. Guayaquil: Escuela superior Politécnica del Litoral.
- Powers , T., Copeland, L., & Mann, H. (1959). *Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes*.
- Radhi, M. S. (2020). Relationship between steel mass loss and accelerated corrosion regimes in reinforced concrete columns. *Article in IOP Conference Series Materials Science and Engineering* , 1-8.
- Radhi, M., Hassan, M., & Gorgis, I. (2020). Compressive Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns. *Engineering and Technology Journal*, 1618-1628.
- Raydel Lorenzo , R., da Silva Sousa, F., Silva Avelino de Castro, P., Carvalho Quintanilha, L., & Bezerra Montel, A. (2018). Estudio de la vida útil de estructuras de concreto armado atacadas por iones cloruro . *Revista Desafios*, 161-168.
- Renata, A. (2010). *Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: Aplicación de la resistividad eléctrica*. Madrid : Universidad politecnica de madrid .
- Roa-Rodríguez , G., Aperador-Chaparro , W., & Delgado-Tobón , E. (2015). Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4), octubre-diciembre* , 567-568.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. costa rica: Tecnologia en marcha.
- Schweitzer, P. (2010). *Fundamentals of Corrosion*. New York: Taylor & Francis.
- Soto Camino , J., Gandía Romero, J. M., & Monzón Bello, P. (2014). *Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico*. Valencia, España.: Universidad politecnica de valencia.
- Torres Acosta , A. A., Fabela Gallegos , M. F., Fabela Gallegos , M. D., Vázquez Vega, D., Hernández Jiménez , J. R., Martínez Madrid , M., & Muñoz Nova, A. (2002). *CAMBIO EN LA RIGIDEZ Y*. Mexico: Sanfandila.

Torres Acosta, A., Fabela Gallegos, M., Vázquez Vega , D., Hernández Jiménez , J., Martínez Madrid , M., & Muñoz Noval , A. (2002). *Cambios en la rigidez y resistencia a la flexion de vigas de concreto dañadas por corrosion del refuerzo*. Mexico: Sanfandila.

Valladolid, U. d. (2014). *Apuntes para una breve introducción a la Resistencia de materiales y temas relacionados*. . Valladolid, España: Universidad de Valladolid.

Vázquez, M. (2018). *La corrosión El peor de los villanos cuando dominan los metales*. Mar del Plata : EUDEM.

## Anexos

## Anexo A. Investigación de la literatura científica

A continuación, se muestran tablas con información de investigaciones relacionadas con la corrosión del acero en el concreto y que en alguna ocasión fueron consultadas para efectos de adquisición de conocimiento sobre antecedentes del tema y algunas de apoyo para el desarrollo de la investigación.

Tabla 38.

*Literatura científica consultada para la investigación.*

Identificación	Objetivo general	Categorías / Variables	Instrumentos para la recolección de la información	Resultados
Kevin Jiménez Vázquez, Lozano Ovalle, "análisis de la influencia de sulfatos y cloruros en el deterioro de estructuras en zonas costeras del atlántico colombiano". Universidad católica de Colombia, 2018.	Determinar la influencia de cloruros y sulfatos en el comportamiento de las propiedades del concreto estructural y su deterioro en ciudades de la zona costera del Atlántico Colombiano.	·Estructuras de concreto y zona costera. ·Cloruro ·Sulfatos ·Resistencia a la compresión. ·Temperatura	·Estudio bibliográfico en fuentes. ·Pruebas de laboratorios de materiales.	las muestras expuestas a concentraciones de sulfatos y cloruro + sulfatos han tenido una disminución en la resistencia a la compresión a los 28 días.
1. Lu ZH, Li H, Li W, Zhao YG, Tang Z, Sun Z. Degradación del comportamiento de corte y patrón de falla de una viga de concreto reforzado con corrosión de estribo inducida por cloruro. Avances en	Análisis de los efectos de la corrosión inducida por cloruros del acero de refuerzo en el comportamiento de cortante y patrón de falla de vigas de	·Viga ·Estribo ·Concreto armado ·corrosión inducida por cloruros. ·degradación del	·Estudio bibliográfico en fuentes. ·Pruebas de laboratorios de materiales.	La falla por corte-compresión siempre ocurrió en las vigas corroídas con mayor resistencia del concreto (C40) o menor índice de pérdida por corrosión del estribo ( $\eta_s < 20\%$ ). La falla por cortante con falla del estribo ocurre

Ingeniería Estructural.	hormigón armado	comportamiento de corte.	fácilmente en vigas con menor resistencia del concreto (C30) y mayor índice de corrosión del estribo ( $\eta_s > 50\%$ ).
1. Yang J, Guo T, Li A. Investigación experimental sobre el comportamiento a largo plazo de vigas de hormigón pretensado bajo el efecto acoplado de carga sostenida y corrosión. Avances en Ingeniería Estructural.	Estudio experimental sobre el comportamiento a largo plazo de vigas de hormigón pretensado bajo el efecto acoplado de carga sostenida y corrosión.	-viga de hormigón pretensado, carga sostenida ·corrosión. ·capacidad de flexión. ·pérdida de pretensado. ·carga sostenida	·Estudio bibliográfico en fuentes. ·Pruebas de laboratorios de materiales. La corrosión en las hebras de acero afecta fuertemente las capacidades de flexión y el modo de falla de las vigas con un índice de corrosión del 30%. Durante las pruebas de capacidad de flexión, la fractura de los cordones de acero provocó la falla de las vigas corroídas BY-0, BY-50 y BY-100, todas mostrando características frágiles inesperadas.
Mohsen Shayanfar, Mohammad Barkhordari Mohammad Ghanooni - "Effect of longitudinal corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure"	Ali Examinar la reducción de la resistencia a la compresión del concreto debido a la corrosión de las barras de refuerzo	*Reducción de la resistencia a la compresión * Corrosión	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales La relación agua cemento es considerada como el parámetro más importante que afecta la resistencia a la compresión del concreto ya que es el único factor cambiante durante las pruebas en las probetas, todos los demás parámetros y condiciones son iguales y constantes para todos los especímenes
Ignasi Fernandez, Manuel F. Herrador, Antonio R. Marí, Jesús M. Bairán "Ultimate Capacity of Corroded Statically Indeterminate	evaluar la variación en la mecánica propiedades del acero corroído y la reducción en la	*Reducción de la resistencia a la compresión * Niveles de Corrosión * Reducción de	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales *Reducción de la capacidad de carga hasta en un 55% debido a la rotura de una muestra fallando prematuramente estando dentro de un

Reinforced Concrete Members"		interacción de unión entre el hormigón y el acero debido a la Corrosión del refuerzo de acero	de la capacidad de carga			nivel de corrosión entre 15 y 24%.
Mushtaq Radhi, Iqbal Maan Hassan "Compressive Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns"	Sadiq Gorgis, Salman	Determinar la influencia del nivel de daño por corrosión en el desempeño de las columnas circulares de hormigón armado	la del daño en el desempeño de las columnas de	*Reducción de la resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas laboratorios de materiales	*La capacidad de carga de las columnas de hormigón armado corroídas se reduce a medida que el nivel de la corrosión aumenta. La reducción de las cargas últimas fue de aproximadamente 19%, 29% y 45% a nivel de año por corrosión del 10%, 20% y 30%, respectivamente
Ali Goharrokhi, Jaml Ahmadi, Mohsen Ali Shayanfar, Mohammad Ghanooni-Bagha and Kiarash Nasserasadi "Effect of transverse reinforcement on compressive strength reduction of stirrup-confined: an experimental study"		investigar la cantidad de reducción en la capacidad de probetas de hormigón armado en diferentes grados de corrosión.	la de en la de	*Porcentaje de corrosión a la compresión	*Pruebas laboratorios de materiales	Los resultados experimentales demostraron que los estribos con gran espaciamiento y confinamiento menor eran más sensibles a la corrosión. Además, se observó que la preparación de muestras de los estribos d 4 redujo aún más la resistencia a la compresión en los grados de corrosión más bajos (aproximadamente 3%).
L. Abosrra, A.F. Ashour, M. Youseffi "Corrosion of steel reinforcement in concret of different compressive strenghts"		Determinación de las diferentes resistencias a la compresión en probetas de hormigón armado durante 1, 7 y 15 días	de las diferentes resistencias a la compresión en probetas de hormigón armado durante	*Porcentaje de corrosión a la compresión	*Pruebas laboratorios de materiales	Las probetas de alta velocidad de corrosión mostraron severidad de corrosión. daño porción con alta reducción en el área de la barra de acero.

Ing. Alvaro Daniel Obando Ramirez "propuesta de procedimientos de las técnicas: ruido electroquímico, resistencia a la polarización e impedancia electroquímica usadas en la medición de la corrosión del refuerzo en el concreto reforzado"	Proponer procedimientos de resistencia a la polarización, ruido e impedancia electroquímicos para la medición de la corrosión en las barras de refuerzo del concreto reforzado	*Aceleración de proceso de corrosión *Resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en los resultados de compresión, que el uso de 30% de ceniza volante en los morteros reduce la resistencia a compresión de estos, desventaja que es compensada con el mejor comportamiento contra el ataque por iones cloruros y el consiguiente aumento de su durabilidad. Por otra parte, el uso de sal en el agua de mezclado de los morteros también reduce la resistencia a compresión de estos.
Ngoc Son Vu a, Bo Yub, Bing Li "Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement"	Estudio experimental sobre la relación tensión-deformación del hormigón confinado	*Nivel de corrosión *Resistencia a la compresión	*Pruebas laboratorios materiales	en Los resultados experimentales revelaron que el nivel de corrosión y la relación volumétrica de refuerzo transversal son los más factores importantes que afectan las relaciones tensión-deformación de hormigón confinado rodado.
Miguel A. Baltazar Zamora, Demetrio Nieves, Erick Maldonado, Carlos Barrios, Rosa Núñez, Heidi Hervert, Facundo Almeraya, Yarelys Martín "Comportamiento de la corrosión y resistencia mecánica de concreto contaminado con 2 y 4% de NaCl"	Evaluar el comportamiento electroquímico y mecánico de especímenes de concreto limpio y contaminado con 2 y 4% de NaCl (de la cantidad de agua), elaborados con dos tipos de cemento Compuesto e Impermeable	*Potencial de corrosión *Cloruros *Resistencia a la compresión	*Pruebas laboratorios materiales	en Los especímenes de cemento compuesto normal presentan un comportamiento mejor y más homogéneo que los de cemento impermeable, ubicándolos en un 10% de probabilidad de corrosión.

Ueli M. Angst and Bernhard Elsener "The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures"	Previsión de la vida útil de las infraestructuras de hormigón en entornos corrosivos	*Corrosión inducida *Cloruros	*Estudio bibliográfico fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en	La concentración de cloruro en la superficie del acero necesaria para iniciar la corrosión disminuye al aumentar la longitud de las vigas de hormigón armado expuestos a cloruros
Donald F. Griffin and Robert L. Henry "The effect of salt in concrete on compressive strength, water vapor transmission of reinforcing steel"	Determinar los efectos del cloruro de sodio y sal de agua de mar separado en hormigón.	*Cloruro de sodio *Agua de mar *Corrosión del acero *Resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en	Cuando se utiliza agua de mar en agua de mezcla de hormigón, la salinidad a la que el acero desarrolla una tasa de corrosión significativa que parece variar directamente con el $W / C$ . Dentro de los límites de esta investigación, para el concreto con bajo $W / C$ , el máximo la velocidad de corrosión aumentó rápidamente a niveles más bajos de salinidad.
Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria and Saleem Akhtar "Monitoring Corrosion of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures"	Analizar la importancia de monitorear la corrosión de las armaduras y describir los diferentes métodos para evaluar el estado de corrosión de RC estructuras, especialmente el método de potencial de celda media (HCP)	*Probabilidad de corrosión *Potencial de corrosión	*Estudio bibliográfico fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en	En el concreto con baja resistividad, la distribución del potencial en la superficie representa el potencial en el acero, en el concreto se puede realizar una mejor interpretación de las lecturas potenciales de acuerdo con la resistividad. Con el aumento de la cobertura del hormigón, la diferencia entre la superficie y el potencial de interfaz aumenta.
Mohammad Ismail, and Ernest Egba "Effects of climate and corrosion on concrete"	Analizar los efectos y el comportamiento del clima y la corrosión en el hormigón,	*Exposición a la corrosión *Resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en	Los resultados muestran que las muestras de NBPu, NBP, NBU, NBS y NBL perdieron la fuerza de unión en un 40%, 36%, 32%, 28% y



behaviour"	utilizando la fuerza de adherencia del hormigón como caso de estudio.					8% después de doce meses de sujeción a condiciones de exposición respectivamente.
Esteban Correa, Sergio Peñaranda, Juan Castaño, Félix Echeverría "Deterioro del concreto en ambientes urbanos de Colombia"	Evaluar la velocidad de corrosión de las barras de refuerzo y el porcentaje de carbonatación en pobreta de concreto.	la de las de el de de	*Deterioro del concreto Causado por iones de cloruro y carbonatación	*Pruebas laboratorios materiales	en de	Se presentaron las mayores tasas de corrosión en la estación residencial de Barranquilla, que contenía alta concentración de iones cloruro en el aire, y en todas las estaciones de Bogotá, donde a principal fuente de deterioro de la barra de refuerzo fue la carbonatación de mortero.
Ji-Gang Xu a, Gang Wu a,*, De-Cheng Feng a, Demitrios M. Cotsovos b, Yong Lu c "Seismic fragility analysis of shear-critical concrete columns considering corrosion induced deterioration effects"	Analizar la fragilidad sísmica de estructuras críticas a cortante con consideración de los efectos de la corrosión	la de a con de de	*Fragilidad sísmica de corrosión	*Pruebas laboratorios materiales	en de	La corrosión tiene efectos significativos sobre la fragilidad sísmica de la columna, especialmente para estados de daños más severos. Las capacidades se reducirían a 0.5g y 0.54g en 50 y 100 años con una reducción del 14.3% y el 20.6% respectivamente.
Mohammad Ismail *, Bala Muhammad, Mohamed ElGelany Ismail "Compressive strength loss and reinforcement degradations of reinforced concrete structure due to long-term exposure"	Evaluar el desempeño de hormigón y refuerzo después de haber sido sometido a condiciones ambientales durante 6 años	el y de a	*Pérdida de resistencia a la compresión *Corrosión del refuerzo	*Estudio bibliográfico fuentes *Pruebas laboratorios materiales	en de	Considerando la caída en resistencia a la compresión de 32,1 N / mm <sup>2</sup> a 23,35 N / mm <sup>2</sup> corre-Respondiendo a la segunda y última prueba de extracción de testigos, hasta un 27,6% de resistencia. Por tanto, la pérdida podría registrarse en el hormigón de una

estructura en un plazo de 5 años.

Ying Chen, Peng Liu, and Zhiwu Yu "Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength"	Análisis de la influencia de la temperatura, la concentración de CO <sub>2</sub> y la humedad relativa en la profundidad de carbonatación, la resistencia a la compresión del hormigón .	*Resistencia a la compresión *Carbonatación *Factores ambientales	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	*La profundidad de carbonatación del hormigón se correlaciona positivamente con la temperatura y el CO <sub>2</sub> concentración, pero la resistencia a la compresión del hormigón se correlaciona negativamente con la resistencia grado de hormigón.
Raydel Reinaldo, Felype da Silva, Paulo Silva, Avelino de Castro, Lucas Carvalho, Adão Bezerra " estudio de vida útil de estructuras de concreto armado utilizando modelos de difusión de iones de cloruro"	Establecer una norma de ensayo para determinar la vida útil de las estructuras de hormigón armado por acción de los iones de cloruro, además de analizar la variación del coeficiente de difusión al utilizar diferentes relaciones agua / cemento.	*Resistencia a la compresión *Cloruros *Corrosión *Vida útil de la estructura	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	Se pudo comprobar que la relación agua / cemento influye en la concentración de cloruro en las diferentes capas de la estructura de hormigón, es decir, la mayor la relación agua / cemento, mayor es la concentración de cloruro en una capa determinada.
Alireza Farzampour "Compressive Behavior of Concrete under Environmental Effects"	Investigar el desarrollo de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo cuando el material se suelta a temperaturas más bajas a	*Resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	Los resultados muestran que reducir la temperatura de curado más de 15 ° podría resultar en una reducción del 20% en la resistencia a la compresión total, mientras que la disminución de las tasas

	suaves y diferentes índices de humedad				de humedad en un 50% conduce a menos del 10% de caída en la resistencia máxima
E P Kearsley, A Joyce	Determinar el efecto de la corrosión en la fuerza de la unión por considerando diferentes niveles de corrosión.	*Efectos de la corrosión	*Estudio bibliográfico en fuentes	*Pruebas en laboratorios de materiales	La resistencia a la compresión de la especificación del cubo mens alcanzó un valor promedio de 30,0 MPa en 28 días, mientras que las muestras de cubos que fueron probado el mismo día que su correspondiente las losas tenían una resistencia a la compresión entre 24,8 MPa y 35,0 MPa.
Abel Castañeda-Valdéz Manuel Rodríguez-Rodríguez	Demostrar la factibilidad económica de un estudio destinado a prevenir el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado a partir de una comparación entre los costos alcanzados en el estudio con los invertidos en los trabajos de reparación en estructuras de hormigón armado deterioradas	*Factibilidad económica *Costos de trabajo de reparación	*Estudio bibliográfico en fuentes		El estudio basado en su prevención resulta menos costoso en comparación con los costos totales de los trabajos de reparación ya sea en las estructuras reparadas de forma parcial, así como en las reparadas totalmente, sin graves afectaciones ocasionadas por el fenómeno. La extensión en el tiempo de los trabajos costosos de reparación representa un incremento considerable en los ahorros, así como una disminución de los costos de reparación

Carlos E. Arroyave Posada	Comparación de los costos de la corrosión en Colombia con los de otros países	*Costos de corrosión	de	*Estudio bibliográfico en fuentes	El monto de los costos de la corrosión en Colombia es alto; las cifras por sí solas son más que dicientes, para corroborarlo basta con tener en cuenta que un sector que aporte algo así como el 2.5% del P.N.B., ya es de peso económico en el ámbito nacional.
Bertila Aponte1, Matilde Fernández de Romero, Oladis Troconis de Rincón, Silagdy Arias, Melani Contreras, Jomar Ramos y Raúl Collantes	Determinar los costos por corrosión en función del tipo de corrosión y el control aplicado, asociados al mantenimiento correctivo y preventivo en una industria eléctrica y de alimentos en Venezuela, mediante la aplicación del "Software" SACIC diseñado para ello.	*Costos de mantenimiento preventivo	de	*Estudio bibliográfico en fuentes *Ensayos en industrias	En la planta eléctrica el costo total de corrosión corresponde a 527.105.626,76 bolívares; se consideró que el costo por corrosión directo representó el 10% de los costos de mantenimiento total. En la planta de alimento el total de los costos de mantenimiento es de 16.264.328.584 bolívares considerando un consumo aproximado del 5% de costo por corrosión. En la planta eléctrica se invierte mayormente en mantenimiento preventivo que, en el mantenimiento correctivo.
Joaquin Cuervo Tafur, Juan Delgado Fransico Herrera Builes, Carlos Enrique Arroyave Posada	Levantar un inventario de los principales problemas de que se presentan en el sector productivo nacional, que permita trazar	*Indicadores de costos de corrosión *Costos de control de corrosión	de	*Estudio bibliográfico en fuentes	El resultado e la investigación demuestra que nuestra industria convive con la corrosión, sin adecuados programas de prevención; no se tiene un mantenimiento programado para realizar el control; no

		directrices y líneas de acción para combatir el efecto de la corrosión			se tienen registros económicos de los daños a las infraestructuras productivas que permita determinar los efectos negativos sobre las utilidades de la empresa.
Joaquin Tafur, Delgado Fransico Herrera Carlos Arroyave Asdrúbal Giraldo	Cuervo Juan Lastra, Javier Builes, Enrique Posada, Valencia "Análisis estadístico para la determinación del impacto de la corrosión en Colombia.	Determinar la incidencia de los costos y gastos ocasionados por la corrosión en la economía nacional	*Costos de corrosión	de *Estudio bibliográfico en fuentes	Como resultado central se encontró que en 1994 los costos y gastos discretos originados por la corrosión fueron del 1.3% del PIB.
Luigi Di Francesco "Numerical evaluation of the seismic performance of existing reinforced concrete buildings with corroded smooth rebars"	Sarno, Pugliese	Evaluar estructuras de concreto armado expuestas a diferentes niveles de corrosión	*Corrosión *Comportamiento sísmico	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	Análisis estáticos no lineales basados en cuatro exposiciones diferentes y tres cargas laterales patrones demostraron que la corrosión reduce significativamente la capacidad de corte y la ductilidad global de un edificio RC existente. Particularmente, la reducción de la resistencia al corte osciló entre el 20%, para la exposición externa, y el 50%, para toda la estructura expuesto a la corrosión.
Ignasi Fernandez, Manuel F. Herrador, Antonio R. Marí and Jesús	Determina los efectos estructurales de la corrosión del acero	los	*Capacidad ultima	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en	*Fallo prematuro y frágil del anclaje debido a la rotura de muestras de hormigón armado

M. "Ultimate Capacity Corroded Statically Indeterminate Reinforced Concrete Members"	Bairán de refuerzo en piezas de concreto armado estáticamente indeterminadas		laboratorios de materiales	de que simulan el exterior no confinado tiras de una placa (lateralmente no reforzada) resultaron en una reducción de la capacidad de carga hasta en un 55%. *Reducción de la carga Se observó capacidad de ing entre 26 y 39% dentro de los niveles de corrosión que varían entre 15 y se observó el 24%.
Mushtaq Radhila, Maan Hassanb, Iqbal N. Gorgisc "Compressive Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns"	S. Evaluar experimentalmente la influencia del nivel de corrosión seleccionado en el rendimiento mecánico de columnas circulares de hormigón armado	*Deformación	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	el daño por corrosión había reducido sustancialmente el rendimiento de las columnas. La disminución de la capacidad de carga de las columnas corroídas osciló entre 19% a 40% y el nivel de corrosión varió de 10% a 30%, respectivamente.
L. Abosrra, A.F. Ashour, M. Youseffi "Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths"	A.F. Estudiar el efecto del tiempo de exposición y calidad del hormigón sobre la corrosión del acero en el hormigón en una solución de cloro usando técnica de polarización potenciodinámica junto con evaluación de la fuerza de unión entre acero / hormigón corroído	*Resistencia a la compresión	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	*Las muestra de concreto de baja resistencia registraron el potencial de corrosión libre más activo y la densidad de corriente de corrosión más alta en todos los tiempos. *Tiempo de exposición a la tasa de corrosión. Por otro lado, una mayor resistencia del hormigón redujo las tasas de corrosión del acero. También se observó corrosión por picaduras debido al ataque de cloruro en la superficie brava del acero.

Ngoc Son Vu a, Bo Yub, Bing Li "Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement"	Estudio experimental sobre la relación tensión-deformación del hormigón confinado que considera los efectos de la corrosión del refuerzo transversal.	*Relación estrés - deformación	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	la rigidez inicial no se vio afectado significativamente por el aumento de la corrosión nivel. Sin embargo, el mayor nivel de corrosión resultó en la menor máxima resistencia del hormigón y la deformación axial del hormigón a la máxima fuerza.
S. Altoubat, M. Maalej, and F. U. A. Shaikh "Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete"	Diseñar un programa experimental para estudiar cuál de las dos técnicas de corrosión acelerada (usando voltaje y corriente constantes) produce más daño por corrosión por una cantidad similar de corrosión inducida a nivel (pérdida de acero).	*Corrosión	*Pruebas en laboratorios de materiales	Los resultados de la prueba generados muestran que la corrosión acelerada usando corriente constante impresa produce más daño por corrosión que el que utiliza voltaje constante
Yujing Lv, Wenhua Zhang, Fan Wu, Huang Lil, Yunsheng Zhang and Guodong Xu "RESEARCH Influence of Initial Damage Degree on the Degradation of Concrete Under Sulfate Attack and Wetting-Drying Cycles"	Estudiar el mecanismo de degradación y propiedades mecánicas del hormigón con daño inicial bajo ataque de sulfato.	*Resistencia a la compresión *Modulo elástico	*Estudio bibliográfico en fuentes *Pruebas en laboratorios de materiales	Módulo de elasticidad dinámico relativo de especificación D0 aumenta continuamente antes de 90 ciclo ataques de sulfato después de 90 ciclos, el RDME gradualmente disminuye. Sin embargo, para las muestras D 1 y D 2 , después 30 ciclos, el RDME comenzó a disminuir.

*Nota. Fuente: elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Anexo B. Correlaciones %Nivel de corrosión vs %Disminución de F`c**

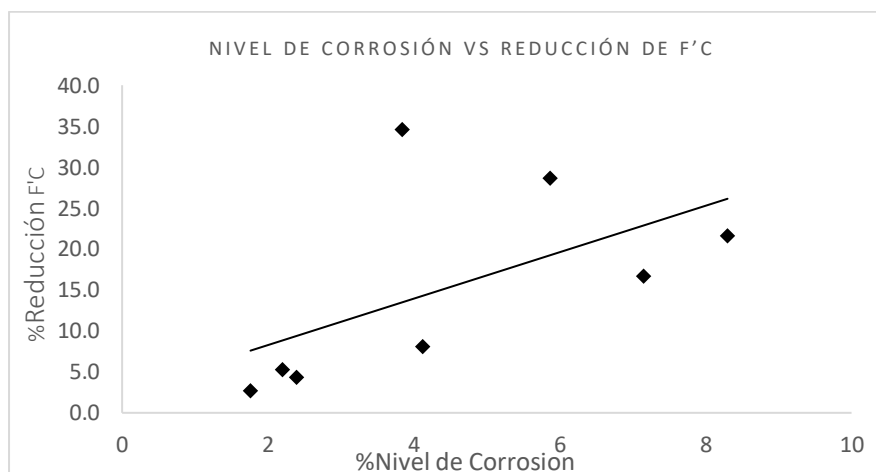
A continuación, se presenta la información procesada para correlacionar estas 2 variables. Se muestra una tabla donde se encuentran los valores de las variables y un gráfico que representa la relación entre variables.

**Tabla 39.**

*Datos de porcentaje de porcentaje de corrosión vs perdida a la resistencia a la compresión.*

RELACIÓN W/C= 0.4						
Prueba N°	Probeta	Nivel de corrosión NC%	Días de curado	F'c de base (Mpa)	F'c después del laboratorio (Mopa)	% reducción de f`c
1	10cmX10cm (1#10)	0	28	44	44	
2	10cmX10cm (1#10)	1.76	42	48.5	47.2	2.7
3	10cmX10cm (1#10)	2.39	42	48.5	46.4	4.3
4	10cmX10cm (1#12)	2.2	42	49.2	46.6	5.3
5	10cmX10cm (1#10)	3.84	90	50.9	33.3	34.6
6	10cmX10cm (1#10)	8.3	90	50.9	39.9	21.6
7	10cmX10cm (1#12)	4.12	90	52.1	47.9	8.1
8	10cmX10cm (1#12)	5.87	90	52.1	37.2	28.6
9	10cmX10cm (1#12)	7.15	90	52.1	43.4	16.7

*Nota: Datos obtenidos de fuente: Shayanfar, Barkhordari and Ghanooni-Bagha, (2016).*



*Figura 116. Porcentaje de reducción de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:*

*Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

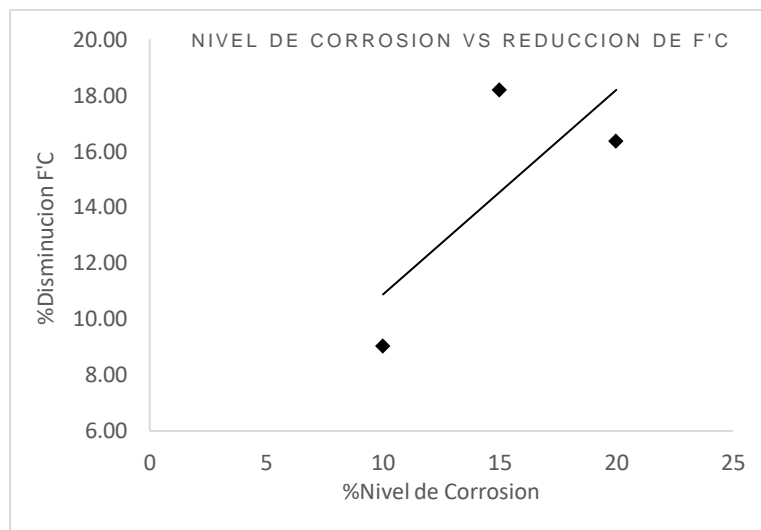


**Tabla 40.**

*Datos de porcentaje de nivel de corrosión, resistencia a la compresión después del ensayo y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Grupo	Nivel de corrosión % NC	F'c base	F'c después del ensayo	% disminución F'c
0	0		0	0
1	10	45	40.93	9.04
2	15	45	36.81	18.20
3	20	45	37.64	16.4

*Nota: Fuente: Fernandez, Herrador, Marí y Bairán (2018).*



*Figura 117. Porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión.*

*Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Tabla 41.**

*Datos de porcentaje de nivel de corrosión, resistencia a la compresión después del ensayo y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Grupo	Nivel de corrosión %NC	F'c base	F'c después del ensayo	% disminución f'c
0	0		0	0
1	10	45	41.4	8.0
2	15	45	41.1	8.67
3	20	45	38.55	14.3

*Nota: Fuente: Fernandez, Herrador, Marí y Bairán (2018).*

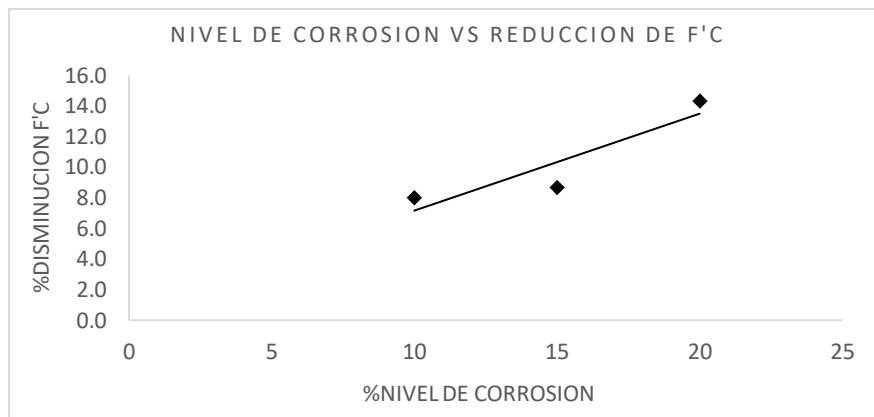


Figura 118. Porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión.

Fuente: Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 42.**

Datos de porcentaje de nivel de corrosión, resistencia a la compresión después del ensayo y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Grupo	Nivel de corrosión %NC	F'c base	F'c después del ensayo	% disminución f'c
0	0			0
1	10	45	43.03	4.38
2	15	45	39.36	12.5
3	20	45	39.11	13.1

Nota: Fuente: Fernandez, Herrador, Marí y Bairán (2018).

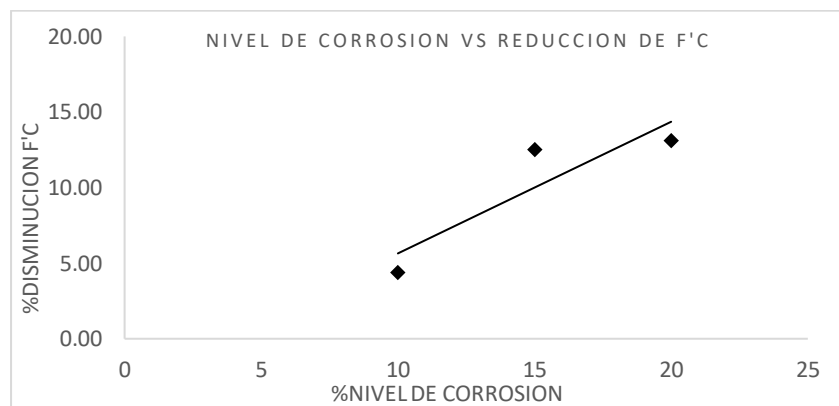


Figura 119. Porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión.

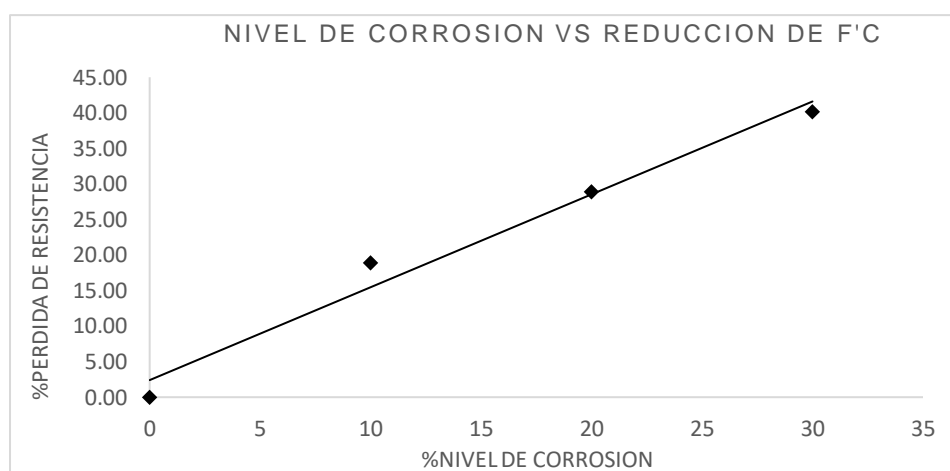
Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 43.**

*Datos de porcentaje de nivel de corrosión, resistencia a la compresión después del ensayo y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Grupo	Nivel de CORROSION %NC	F'c base	F'c despues del ensayo	%Disminucion f'c
0	0	51.9	51.9	0.00
1	10	51.9	42.1	18.87
2	20	51.9	36.9	28.92
3	30	51.9	31.1	40.20

*Nota: Fuente: Mushtaq S, Maan S, Iqbal N (2020).*



*Figura 120. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:*

*Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Tabla 44.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Grupo	Nivel de corrosión %NC	% Disminución f'c
0	0	0
1	2.1	3
2	3.4	15
3	5.56	23

*Nota: Fuente: Goharrokhi, Ahmadi, Shayanfar, Ghanooni-Bagha, Nasserasadi (2019).*

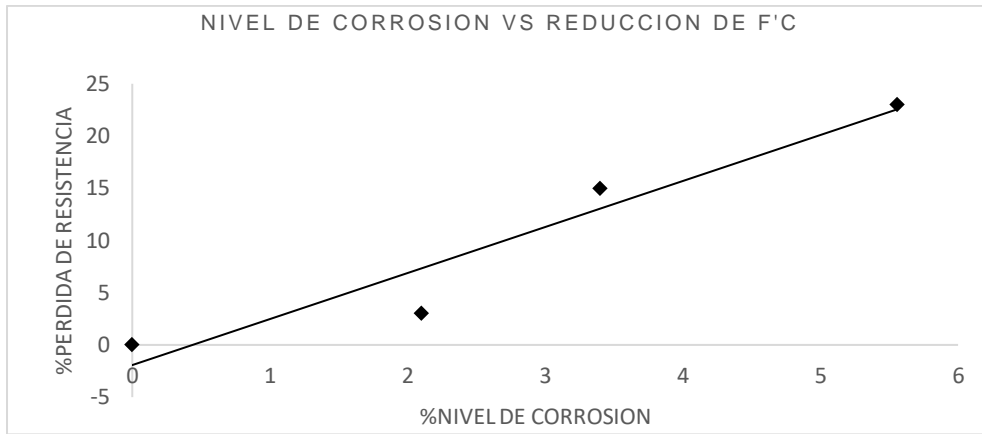


Figura 121. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 45.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Grupo	Nivel de corrosión %NC	% Disminución
0	0	0
1	2.3	2
2	3.7	10
3	4.63	23

Nota: Fuente: Goharrokhi, Ahmadi, Shayanfar, Ghanooni-Bagha, Nasserasadi (2019).

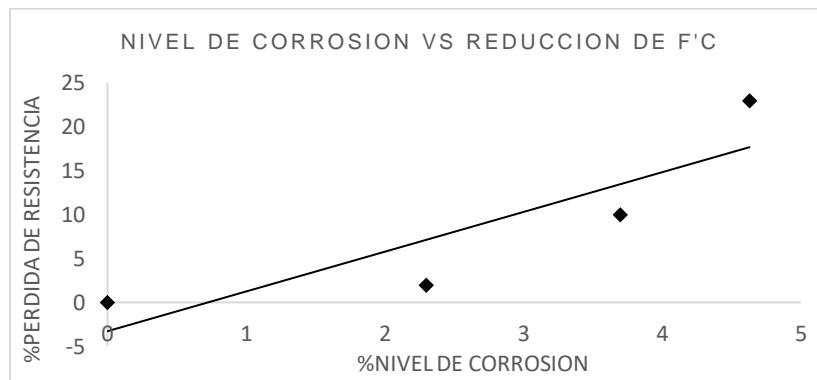


Figura 122. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 46.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Grupo	Nivel de corrosión %NC	% Disminución f'c
0	0	0
1	7.14	8
2	8.5	9
3	10.71	8

Nota: Fuente: Goharrokhi, Ahmadi, Shayanfar, Ghanooni-Bagha, Nasserassadi (2019)

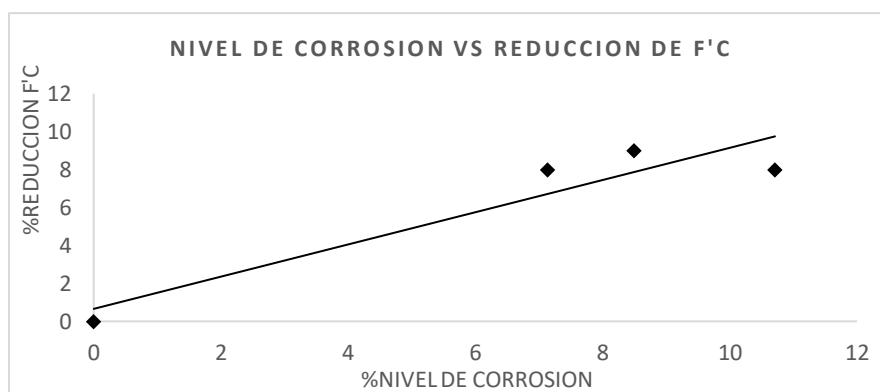


Figura 123. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:

Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 47.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Grupo	Nivel de corrosión %NC	% Disminución f'c
0	0	0
1	5.1	5
2	10.1	8
3	12.05	7

Nota: Fuente: Goharrokhi, Ahmadi, Shayanfar, Ghanooni-Bagha, Nasserassadi (2019).

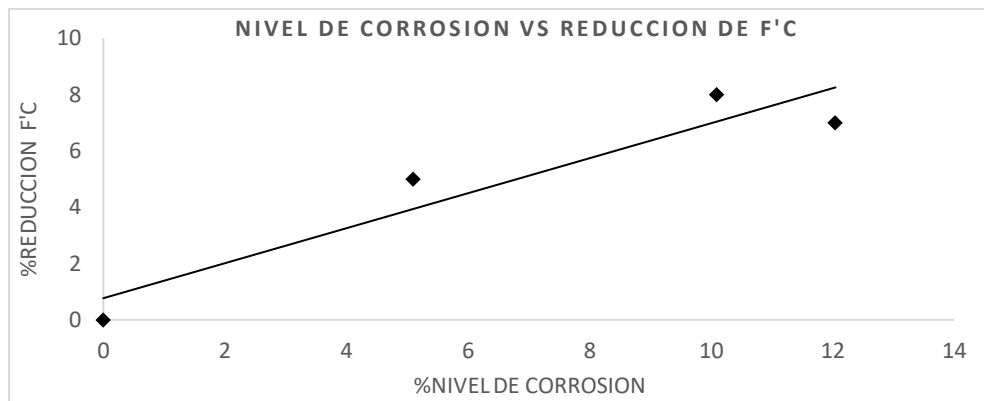


Figura 124. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:

Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 48.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	31.96	31.96	0.0
2	4.9	31.96	30.62	4.2
3	9.8	31.96	29.49	7.7
4	17.5	31.96	24.83	22.3

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

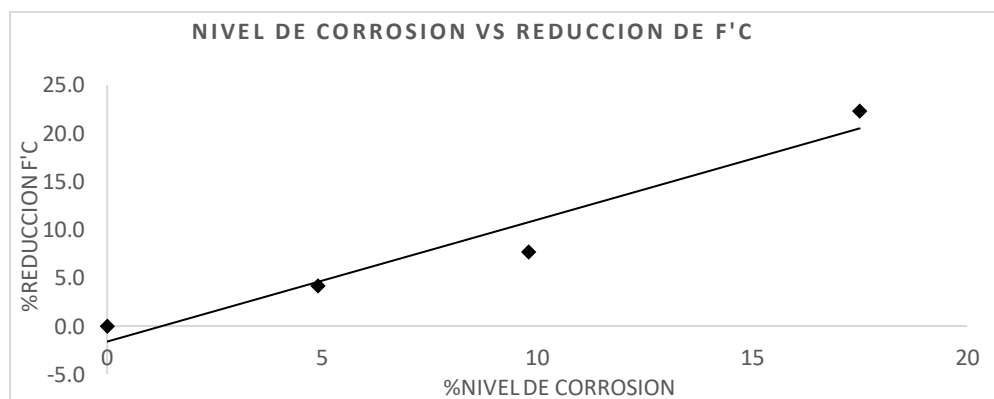


Figura 125. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:

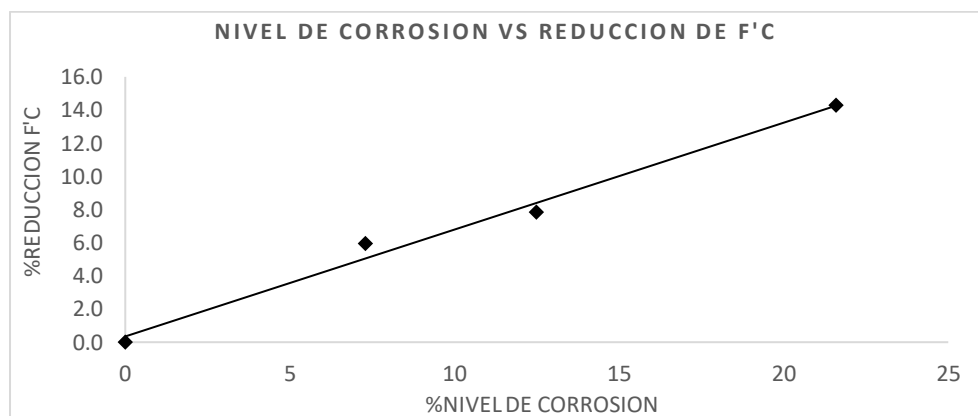
Elaboración propia Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 49.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	33.85	33.85	0.0
2	7.3	33.85	31.84	5.9
3	12.5	33.85	31.2	7.8
4	21.6	33.85	29.01	14.3

*Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).*



*Figura 126. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:*

*Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Tabla 50.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión*

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	39.57	39.57	0.0
2	7.3	39.57	36.78	7.1
3	12.5	39.57	35.61	10.0
4	21.6	39.57	34.27	13.4

*Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).*

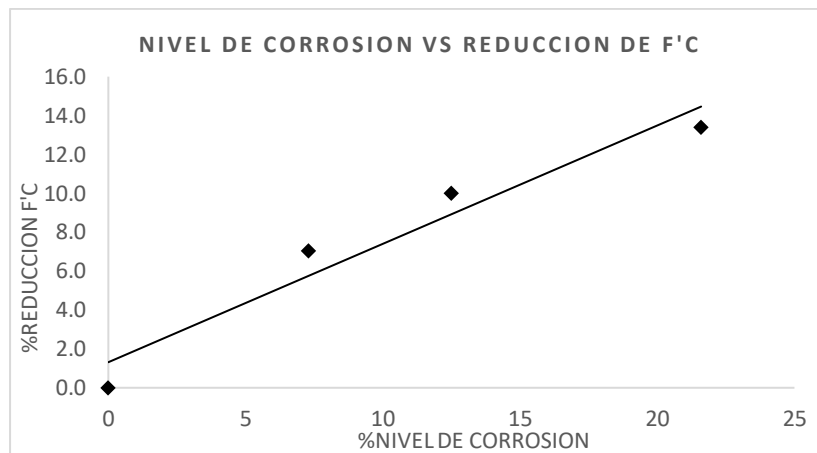


Figura 127. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 51.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	33.84	33.84	0.0
2	7.7	33.84	32.28	4.6
3	10.3	33.84	32.91	2.7
4	12.3	33.84	29.55	12.7

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

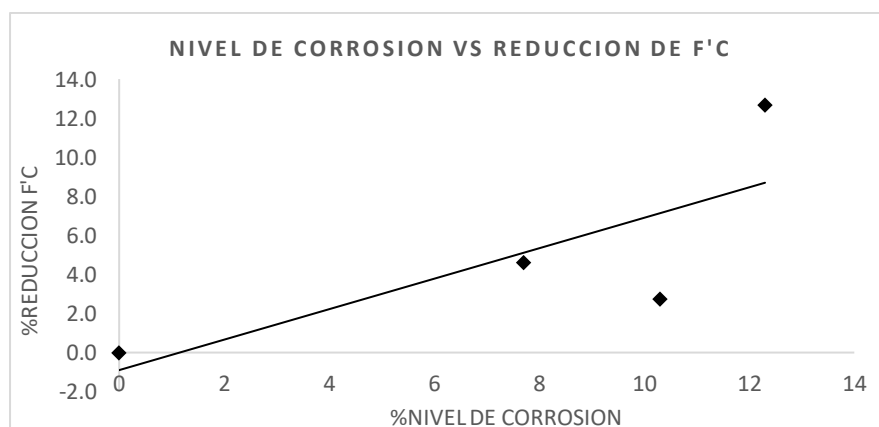


Figura 128. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.



**Tabla 52.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	33.84	33.84	0.0
2	5.6	33.84	32.28	4.6
3	10	33.84	32.91	2.7
4	13.4	33.84	29.55	12.7

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

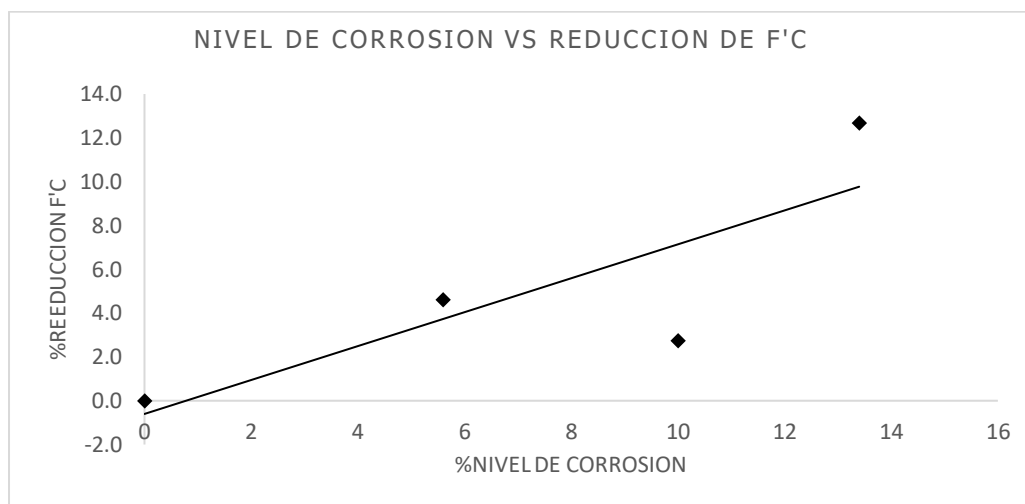


Figura 129. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:

Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 53.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	44.77	44.77	0.0
2	14.9	44.77	43.45	2.9
3	20.8	44.77	41.38	7.6
4	25	44.77	38.45	14.1

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

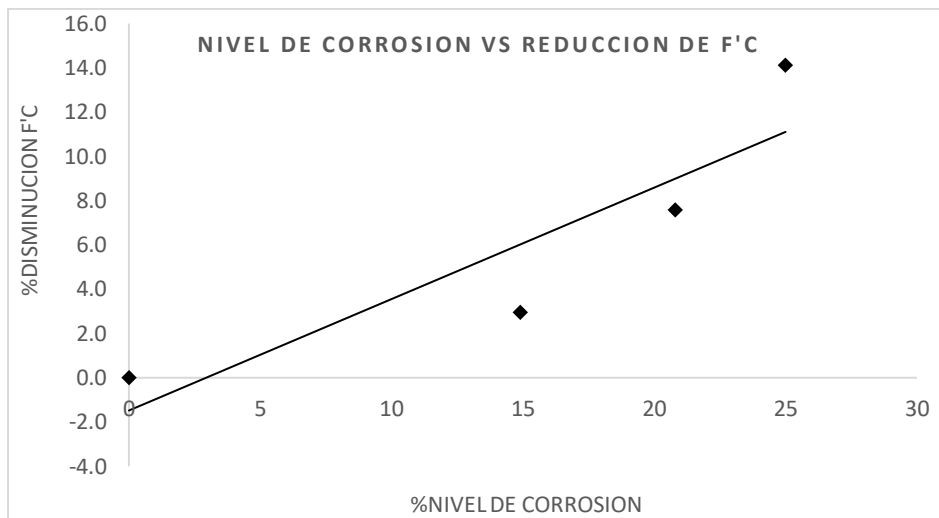


Figura 130. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 54.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	26.33	26.33	0.0
2	16.8	26.33	24.9	5.4
3	21.8	26.33	22.04	16.3
4	31.5	26.33	20.67	21.5

Nota. Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

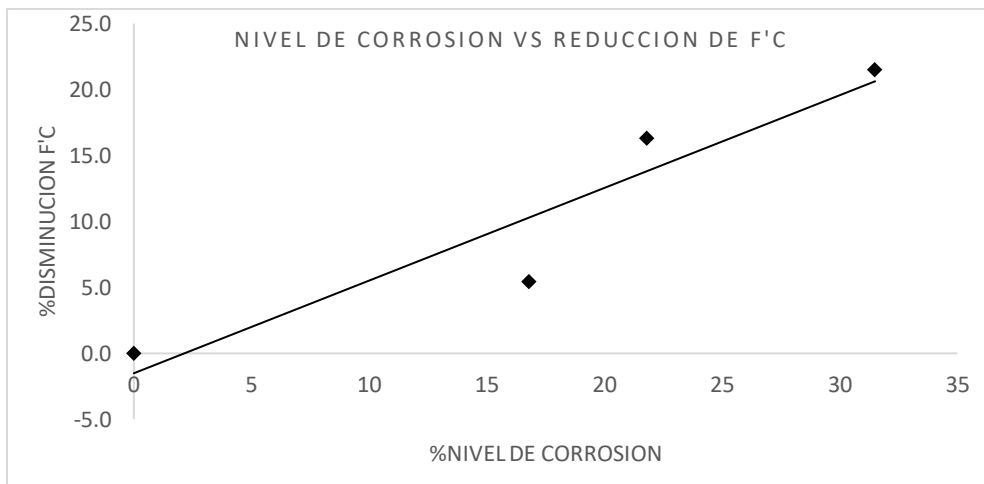


Figura 131. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 55.**

Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	% Reducción de f'c
1	0	36.3	36.3	0.0
2	7.6	36.3	34.21	5.8
3	22.8	36.3	30.06	17.2
4	32.9	36.3	29.87	17.7

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

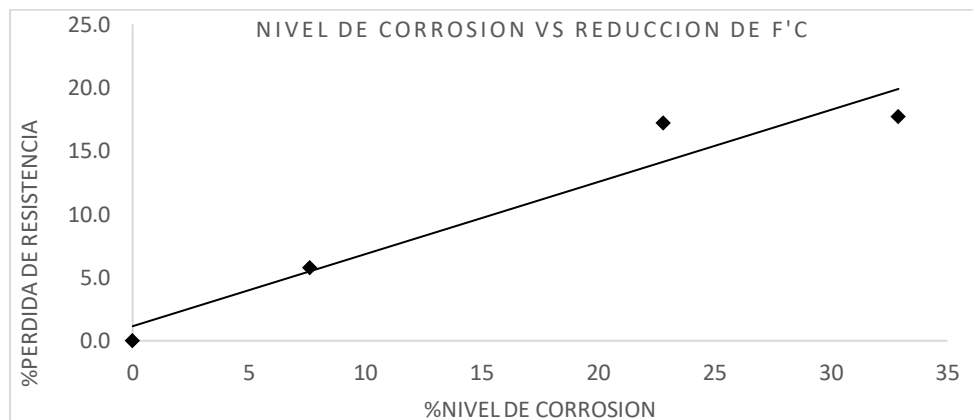


Figura 132. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Tabla 56.**

*Datos de porcentaje de corrosión y porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión.*

Muestra	Nivel de corrosión NC%	f'c de base (Mpa)	f'c después del laboratorio (Mpa)	%reducción de f'c
1	0	44.84	44.84	0.0
2	9.3	44.84	42.39	5.5
3	10	44.84	42.65	4.9
4	13.6	44.84	33.75	24.7

Nota: Fuente: Son, Yu, Li, (2017).

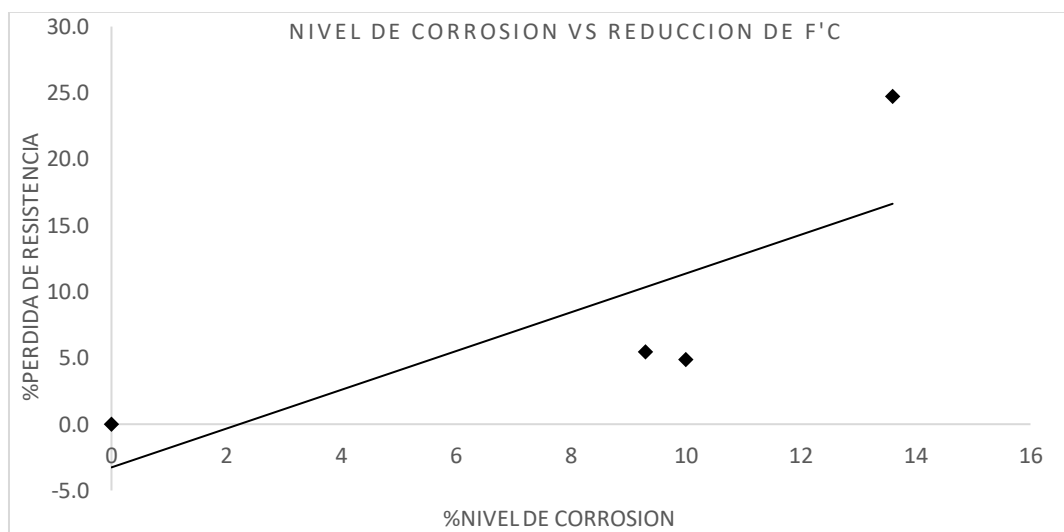


Figura 133. Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión. Fuente:

Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

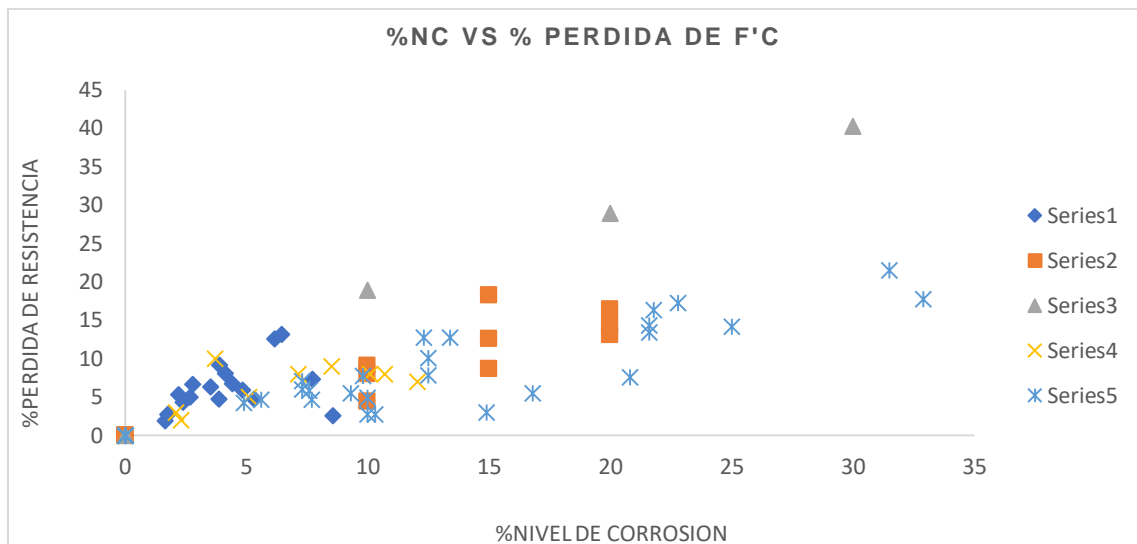


Figura 134. Consolidado de porcentaje de perdida de resistencia a la compresión vs porcentaje de nivel de corrosión para diversos autores de la literatura. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Anexo C. Chequeo de derivas diferentes combinaciones de carga**

A continuación, se presenta en análisis de derivas empleando cada una de las combinaciones de cargas dadas para los diferentes pórticos 2D que presenta la estructura.

**Análisis de derivas para el pórtico A:** A continuación, se presenta el análisis de derivas para el pórtico B el cual se observa seleccionado en la siguiente figura.

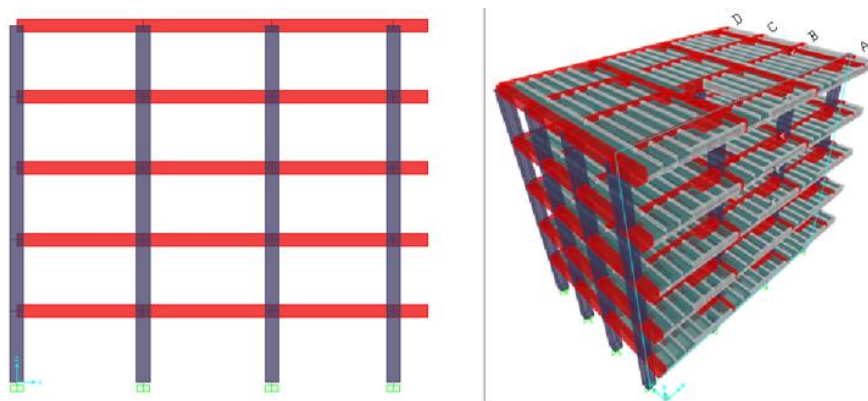


Figura 135. Pórtico A, seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. Fuente. Elaboración propia en SAP 2000 20.

**Tabla 57.***Derivas por piso para el pórtico A.*

Deriva de piso									
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva(m)	h piso (m)	$\alpha$ piso	¿Cumple NSR-10?	Combinación
Piso 1	0.00012	-0.00015	0.00012	-0.00015	0.00020	2.875	0.007%	Si	1.4D
Piso 2	0.00040	-0.00050	0.00028	-0.00035	0.00044	2.875	0.015%	Si	1.4D
Piso 3	0.00073	-0.00090	0.00033	-0.00040	0.00052	2.875	0.018%	Si	1.4D
Piso 4	0.00107	-0.00133	0.00035	-0.00043	0.00055	2.875	0.019%	Si	1.4D
Piso 5	0.00142	-0.00176	0.00035	-0.00043	0.00055	2.875	0.019%	Si	1.4D
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si	1.2D+1.6L
Piso 2	0.00042	-0.00054	0.00029	-0.00037	0.00047	2.875	0.016%	Si	1.2D+1.6L
Piso 3	0.00076	-0.00097	0.00035	-0.00043	0.00056	2.875	0.019%	Si	1.2D+1.6L
Piso 4	0.00113	-0.00143	0.00036	-0.00046	0.00059	2.875	0.020%	Si	1.2D+1.6L
Piso 5	0.00150	-0.00191	0.00037	-0.00047	0.00060	2.875	0.021%	Si	1.2D+1.6L
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 2	0.00042	-0.00054	0.00029	-0.00037	0.00047	2.875	0.016%	Si	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 3	0.00077	-0.00097	0.00035	-0.00044	0.00056	2.875	0.019%	Si	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 4	0.00113	-0.00144	0.00037	-0.00047	0.00059	2.875	0.021%	Si	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 5	0.00151	-0.00193	0.00038	-0.00049	0.00062	2.875	0.021%	Si	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 1	0.01326	-0.00034	0.01326	-0.00034	0.01326	2.875	0.461%	Si	0.9D+1SX
Piso 2	0.03646	-0.00102	0.02321	-0.00068	0.02321	2.875	0.807%	Si	0.9D+1SX
Piso 3	0.05886	-0.00172	0.02240	-0.00071	0.02241	2.875	0.780%	Si	0.9D+1SX
Piso 4	0.07618	-0.00235	0.01731	-0.00063	0.01732	2.875	0.603%	Si	0.9D+1SX
Piso 5	0.08708	-0.00286	0.01091	-0.00051	0.01092	2.875	0.380%	Si	0.9D+1SX
Piso 1	0.00145	0.01270	0.00145	0.01270	0.01278	2.875	0.445%	Si	0.9D+1SY
Piso 2	0.00360	0.03155	0.00215	0.01885	0.01897	2.875	0.660%	Si	0.9D+1SY
Piso 3	0.00556	0.04852	0.00196	0.01697	0.01708	2.875	0.594%	Si	0.9D+1SY
Piso 4	0.00707	0.06107	0.00151	0.01255	0.01264	2.875	0.440%	Si	0.9D+1SY
Piso 5	0.00801	0.06815	0.00094	0.00708	0.00714	2.875	0.248%	Si	0.9D+1SY
Piso 1	0.01330	-0.00039	0.01330	-0.00039	0.01330	2.875	0.463%	Si	1.2D+1SX+1L
Piso 2	0.03660	-0.00119	0.02330	-0.00080	0.02331	2.875	0.811%	Si	1.2D+1SX+1L
Piso 3	0.05911	-0.00204	0.02251	-0.00085	0.02253	2.875	0.784%	Si	1.2D+1SX+1L
Piso 4	0.07653	-0.00282	0.01743	-0.00078	0.01744	2.875	0.607%	Si	1.2D+1SX+1L
Piso 5	0.08756	-0.00348	0.01103	-0.00067	0.01105	2.875	0.384%	Si	1.2D+1SX+1L
Piso 1	0.00149	0.01265	0.00149	0.01265	0.01273	2.875	0.443%	Si	1.2D+1SY+1L
Piso 2	0.00373	0.03137	0.00224	0.01873	0.01886	2.875	0.656%	Si	1.2D+1SY+1L
Piso 3	0.00580	0.04820	0.00207	0.01683	0.01695	2.875	0.590%	Si	1.2D+1SY+1L
Piso 4	0.00743	0.06060	0.00163	0.01240	0.01251	2.875	0.435%	Si	1.2D+1SY+1L
Piso 5	0.00849	0.06752	0.00106	0.00692	0.00700	2.875	0.243%	Si	1.2D+1SY+1L

*Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Análisis de derivas para el pórtico B:** A continuación, se presenta el análisis de derivas para el pórtico B el cual se observa seleccionado en la siguiente figura.

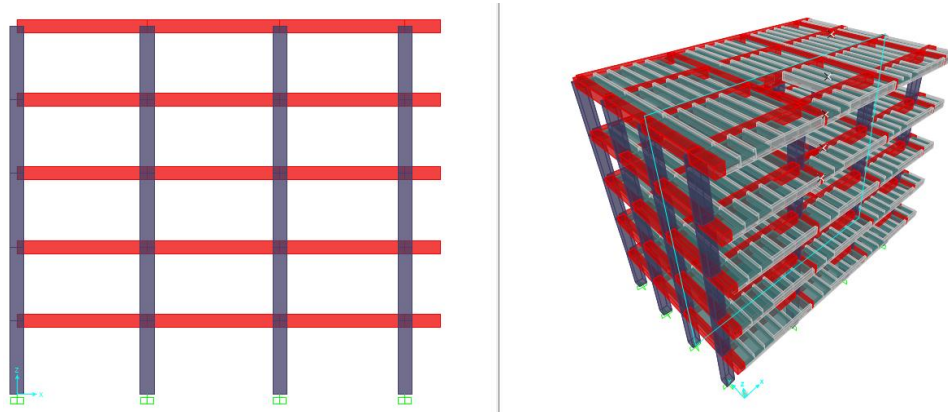


Figura 136. pórtico B, seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. Fuente.

Elaboración propia en SAP 2000 20.

**Tabla 58.**

Análisis de Derivas por piso para el pórtico B.

Deriva de piso									
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva(m)	h piso (m)	$\alpha$ piso	¿Cumple NSR-10?	combinación
Piso 1	0.00012	-0.00015	0.00012	-0.00015	0.00020	2.875	0.007%	Si cumple	1.4D
Piso 2	0.00041	-0.00050	0.00029	-0.00035	0.00045	2.875	0.016%	Si cumple	1.4D
Piso 3	0.00075	-0.00090	0.00034	-0.00040	0.00053	2.875	0.018%	Si cumple	1.4D
Piso 4	0.00110	-0.00133	0.00035	-0.00043	0.00056	2.875	0.019%	Si cumple	1.4D
Piso 5	0.00146	-0.00176	0.00036	-0.00043	0.00056	2.875	0.019%	Si cumple	1.4D
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 2	0.00043	-0.00054	0.00030	-0.00037	0.00048	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 3	0.00079	-0.00097	0.00036	-0.00043	0.00056	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 4	0.00116	-0.00143	0.00038	-0.00046	0.00060	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 5	0.00154	-0.00191	0.00038	-0.00047	0.00061	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 2	0.00043	-0.00054	0.00030	-0.00037	0.00048	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 3	0.00079	-0.00097	0.00036	-0.00044	0.00056	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 4	0.00117	-0.00144	0.00038	-0.00047	0.00060	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 5	0.00156	-0.00193	0.00039	-0.00049	0.00063	2.875	0.022%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 1	0.01337	-0.00034	0.01337	-0.00034	0.01337	2.875	0.465%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 2	0.03677	-0.00102	0.02341	-0.00068	0.02342	2.875	0.815%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 3	0.05938	-0.00172	0.02260	-0.00071	0.02261	2.875	0.787%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 4	0.07685	-0.00235	0.01747	-0.00063	0.01748	2.875	0.608%	Si cumple	0.9D+1SX

Piso 5	0.08786	-0.00286	0.01102	-0.00051	0.01103	2.875	0.384%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 1	0.00052	0.01270	0.00052	0.01270	0.01271	2.875	0.442%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 2	0.00133	0.03155	0.00081	0.01885	0.01887	2.875	0.656%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 3	0.00210	0.04852	0.00077	0.01697	0.01699	2.875	0.591%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 4	0.00274	0.06107	0.00063	0.01255	0.01257	2.875	0.437%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 5	0.00319	0.06815	0.00045	0.00708	0.00709	2.875	0.247%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 1	0.01341	-0.00039	0.01341	-0.00039	0.01341	2.875	0.466%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 2	0.03691	-0.00119	0.02351	-0.00080	0.02352	2.875	0.818%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 3	0.05963	-0.00204	0.02272	-0.00085	0.02273	2.875	0.791%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 4	0.07722	-0.00282	0.01759	-0.00078	0.01761	2.875	0.612%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 5	0.08836	-0.00348	0.01114	-0.00067	0.01116	2.875	0.388%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 1	0.00056	0.01265	0.00056	0.01265	0.01266	2.875	0.440%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 2	0.00147	0.03137	0.00091	0.01873	0.01875	2.875	0.652%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 3	0.00236	0.04820	0.00088	0.01683	0.01685	2.875	0.586%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 4	0.00311	0.06060	0.00075	0.01240	0.01243	2.875	0.432%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 5	0.00368	0.06752	0.00057	0.00692	0.00694	2.875	0.241%	Si cumple	1.2D+1SY+1L

Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Análisis de derivas para el pórtico C:** A continuación, se presenta el análisis de derivas para el pórtico C el cual se observa seleccionado en la siguiente figura

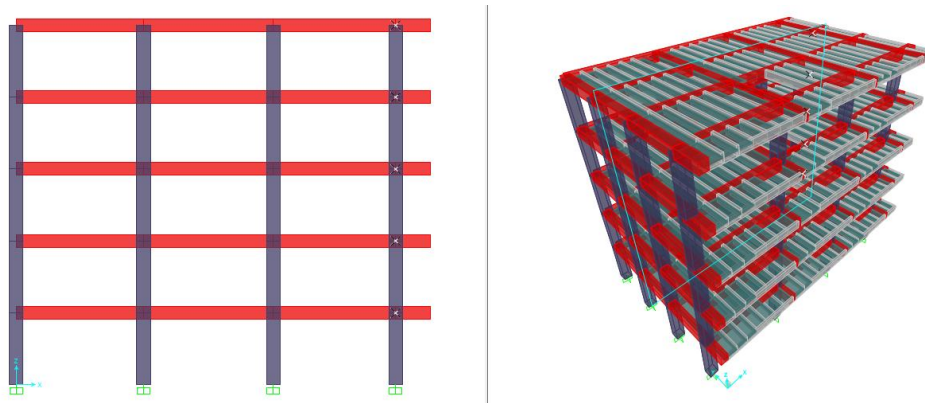


Figura 1167. Pórtico C, seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. Fuente.

Elaboración propia en SAP 2000 20.



**Tabla 59.***Análisis de Derivas por piso para el pórtico C.*

Deriva de piso									
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10	Combinación
Piso 1	0.00013	-0.00015	0.00013	-0.00015	0.00020	2.875	0.007%	Si cumple	1.4D
Piso 2	0.00042	-0.00050	0.00029	-0.00035	0.00045	2.875	0.016%	Si cumple	1.4D
Piso 3	0.00077	-0.00090	0.00035	-0.00040	0.00053	2.875	0.018%	Si cumple	1.4D
Piso 4	0.00113	-0.00133	0.00036	-0.00043	0.00056	2.875	0.020%	Si cumple	1.4D
Piso 5	0.00150	-0.00176	0.00037	-0.00043	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.4D
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 2	0.00044	-0.00054	0.00031	-0.00037	0.00048	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 3	0.00081	-0.00097	0.00037	-0.00043	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 4	0.00119	-0.00143	0.00039	-0.00046	0.00060	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 5	0.00158	-0.00191	0.00039	-0.00047	0.00061	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 1	0.00013	-0.00017	0.00013	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 2	0.00044	-0.00054	0.00031	-0.00037	0.00048	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 3	0.00081	-0.00097	0.00037	-0.00044	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 4	0.00120	-0.00144	0.00039	-0.00047	0.00061	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 5	0.00160	-0.00193	0.00040	-0.00049	0.00063	2.875	0.022%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 1	0.01347	-0.00034	0.01347	-0.00034	0.01348	2.875	0.469%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 2	0.03708	-0.00102	0.02361	-0.00068	0.02362	2.875	0.822%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 3	0.05989	-0.00172	0.02280	-0.00071	0.02281	2.875	0.794%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 4	0.07752	-0.00235	0.01763	-0.00063	0.01764	2.875	0.614%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 5	0.08864	-0.00286	0.01112	-0.00051	0.01113	2.875	0.387%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 1	-0.00040	0.01270	-0.00040	0.01270	0.01271	2.875	0.442%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 2	-0.00093	0.03155	-0.00053	0.01885	0.01886	2.875	0.656%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 3	-0.00135	0.04852	-0.00042	0.01697	0.01697	2.875	0.590%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 4	-0.00159	0.06107	-0.00025	0.01255	0.01256	2.875	0.437%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 5	-0.00163	0.06815	-0.00004	0.00708	0.00708	2.875	0.246%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 1	0.01351	-0.00039	0.01351	-0.00039	0.01352	2.875	0.470%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 2	0.03723	-0.00119	0.02371	-0.00080	0.02372	2.875	0.825%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 3	0.06015	-0.00204	0.02292	-0.00085	0.02294	2.875	0.798%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 4	0.07790	-0.00282	0.01776	-0.00078	0.01777	2.875	0.618%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 5	0.08915	-0.00348	0.01125	-0.00067	0.01127	2.875	0.392%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 1	-0.00036	0.01265	-0.00036	0.01265	0.01265	2.875	0.440%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 2	-0.00079	0.03137	-0.00043	0.01873	0.01873	2.875	0.652%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 3	-0.00109	0.04820	-0.00030	0.01683	0.01683	2.875	0.585%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 4	-0.00121	0.06060	-0.00012	0.01240	0.01240	2.875	0.431%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 5	-0.00112	0.06752	0.00009	0.00692	0.00692	2.875	0.241%	Si cumple	1.2D+1SY+1L

*Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.*

**Análisis de derivas para el pórtico D:** A continuación, se presenta el análisis de derivas para el pórtico D, el cual se observa seleccionado en la siguiente figura

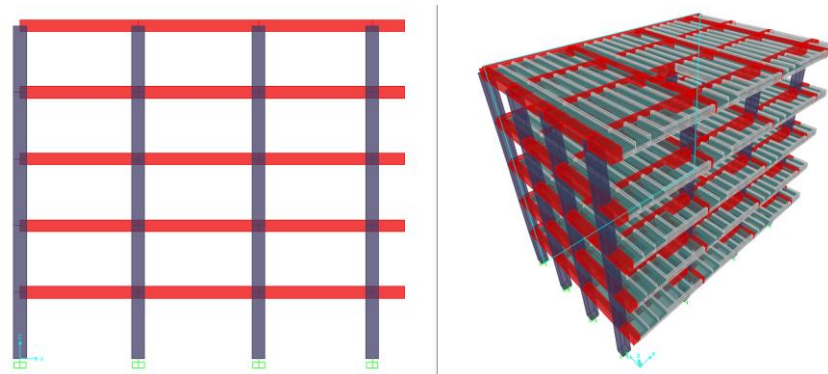


Figura 138. Pórtico D, seleccionado para el análisis de derivas con secciones de elementos dadas. Fuente.

Elaboración propia en SAP 2000.

**Tabla 60.**

*Derivas por piso para el pórtico D.*

Deriva de piso									
Piso	X(m)	Y(m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	Deriva	h piso (m)	$\alpha$ piso	Cumple NSR-10	Combinación
Piso 1	0.00013	-0.00015	0.00013	-0.00015	0.00020	2.875	0.007%	Si cumple	1.4D
Piso 2	0.00043	-0.00050	0.00030	-0.00035	0.00046	2.875	0.016%	Si cumple	1.4D
Piso 3	0.00078	-0.00090	0.00036	-0.00040	0.00054	2.875	0.019%	Si cumple	1.4D
Piso 4	0.00116	-0.00133	0.00037	-0.00043	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.4D
Piso 5	0.00153	-0.00176	0.00037	-0.00043	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.4D
Piso 1	0.00014	-0.00017	0.00014	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 2	0.00045	-0.00054	0.00032	-0.00037	0.00049	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 3	0.00083	-0.00097	0.00038	-0.00043	0.00057	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 4	0.00123	-0.00143	0.00040	-0.00046	0.00061	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 5	0.00163	-0.00191	0.00040	-0.00047	0.00062	2.875	0.022%	Si cumple	1.2D+1.6L
Piso 1	0.00014	-0.00017	0.00014	-0.00017	0.00021	2.875	0.007%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 2	0.00045	-0.00054	0.00032	-0.00037	0.00049	2.875	0.017%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 3	0.00083	-0.00097	0.00038	-0.00044	0.00058	2.875	0.020%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 4	0.00123	-0.00144	0.00040	-0.00047	0.00061	2.875	0.021%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 5	0.00165	-0.00193	0.00041	-0.00049	0.00064	2.875	0.022%	Si cumple	1.2D+1.6L+0.5Lr
Piso 1	0.01358	-0.00034	0.01358	-0.00034	0.01358	2.875	0.472%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 2	0.03739	-0.00102	0.02382	-0.00068	0.02383	2.875	0.829%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 3	0.06040	-0.00172	0.02301	-0.00071	0.02302	2.875	0.801%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 4	0.07819	-0.00235	0.01779	-0.00063	0.01780	2.875	0.619%	Si cumple	0.9D+1SX

Piso 5	0.08942	-0.00286	0.01123	-0.00051	0.01124	2.875	0.391%	Si cumple	0.9D+1SX
Piso 1	-0.00132	0.01270	-0.00132	0.01270	0.01277	2.875	0.444%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 2	-0.00319	0.03155	-0.00186	0.01885	0.01894	2.875	0.659%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 3	-0.00480	0.04852	-0.00161	0.01697	0.01705	2.875	0.593%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 4	-0.00592	0.06107	-0.00112	0.01255	0.01260	2.875	0.438%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 5	-0.00645	0.06815	-0.00053	0.00708	0.00709	2.875	0.247%	Si cumple	0.9D+1SY
Piso 1	0.01362	-0.00039	0.01362	-0.00039	0.01363	2.875	0.474%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 2	0.03754	-0.00119	0.02392	-0.00080	0.02393	2.875	0.832%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 3	0.06067	-0.00204	0.02313	-0.00085	0.02314	2.875	0.805%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 4	0.07859	-0.00282	0.01792	-0.00078	0.01794	2.875	0.624%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 5	0.08995	-0.00348	0.01136	-0.00067	0.01138	2.875	0.396%	Si cumple	1.2D+1SX+1L
Piso 1	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.875	0.000%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.875	0.000%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.875	0.000%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.875	0.000%	Si cumple	1.2D+1SY+1L
Piso 5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.875	0.000%	Si cumple	1.2D+1SY+1L

Nota. Fuente: Elaboración propia, Martínez Jorge, Ospino Freddy.

**Anexo D. Resultado de diagramas de momentos y posteriormente diseños por esfuerzo a cortante y flexión para cada pórtico de la estructura.**

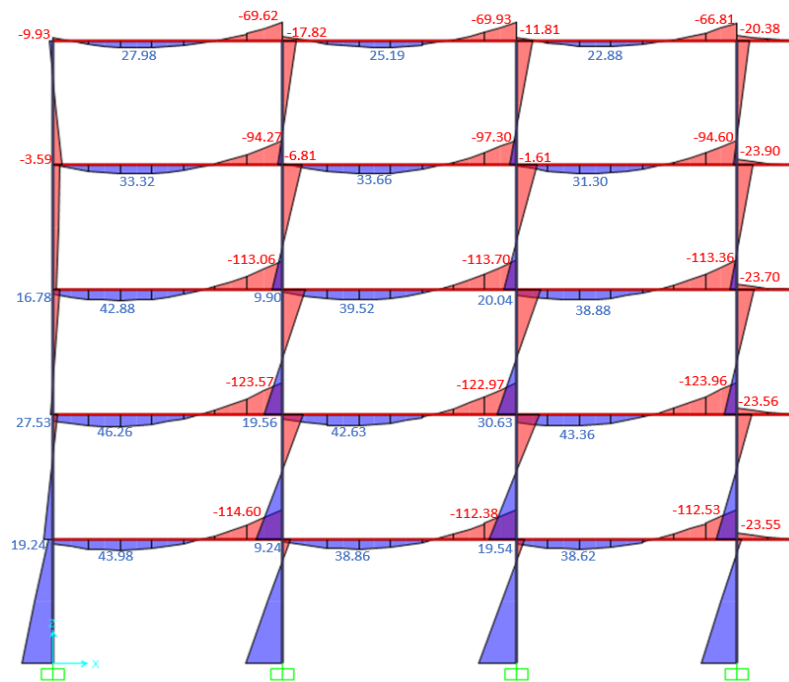


Figura 139. Diagrama de momentos põrtico D, combinaci3n 1.2D+1L+1EX. Elaboraci3n propia en SAP 2000.

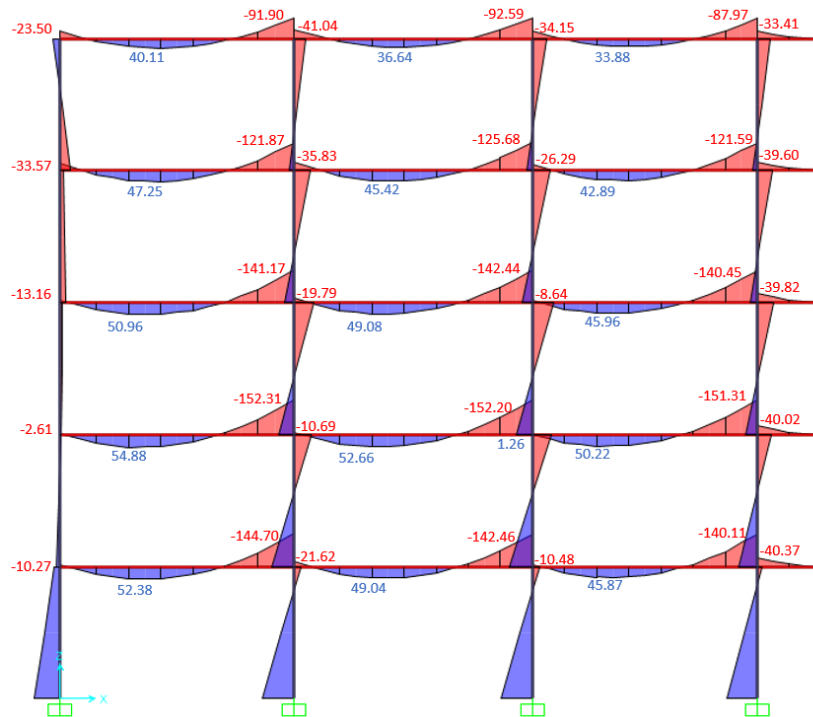


Figura 140. Diagrama de momentos põrtico C, combinaci3n 1.2D+1L+1EX. Elaboraci3n propia en SAP 2000.

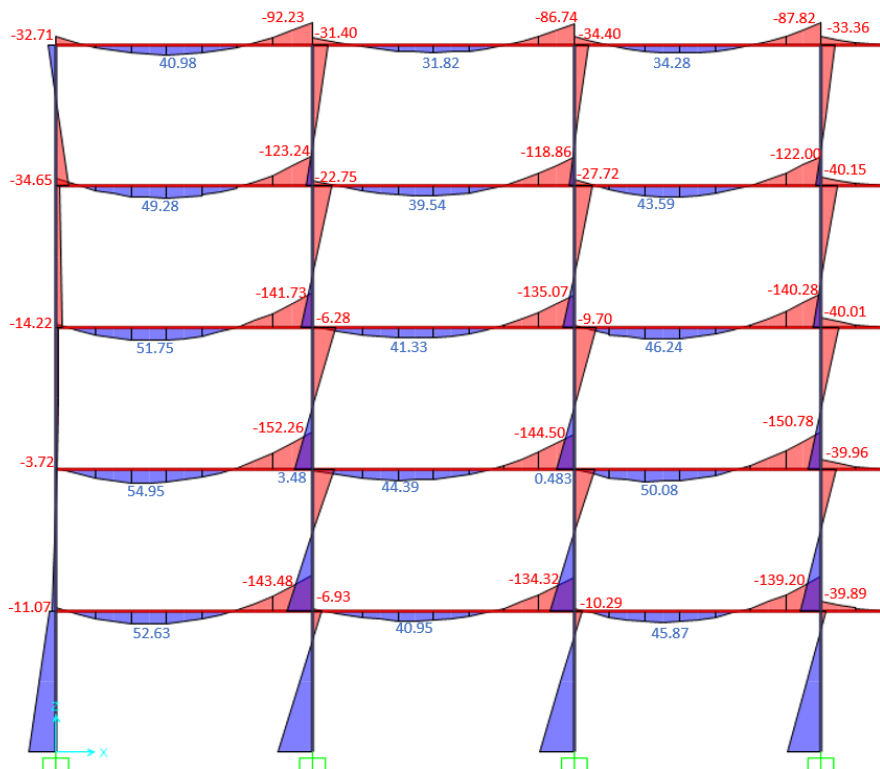


Figura 141. Diagrama de momentos põrtico B, combinaci3n 1.2D+1L+1EX. Elaboraci3n propia en SAP 2000 20.

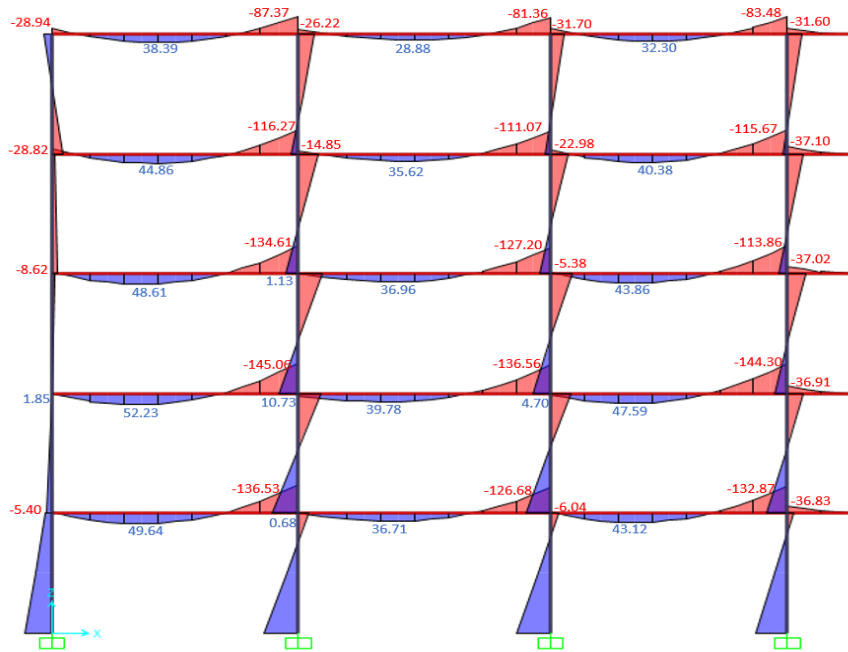


Figura 142. Diagrama de momentos pòrtico A, combinaci3n 1.2D+1L+1EX. Elaboraci3n propia en SAP 2000.

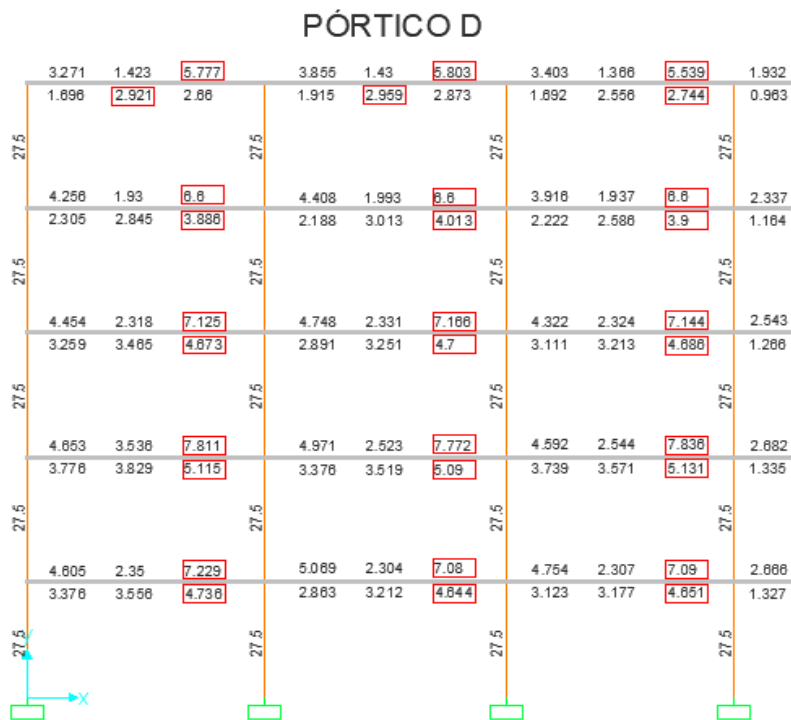


Figura 143. Diseo a flexi3n (As) pòrtico D, combinaci3n 1.2D+1L+1EX. Elaboraci3n propia en SAP 2000 20.

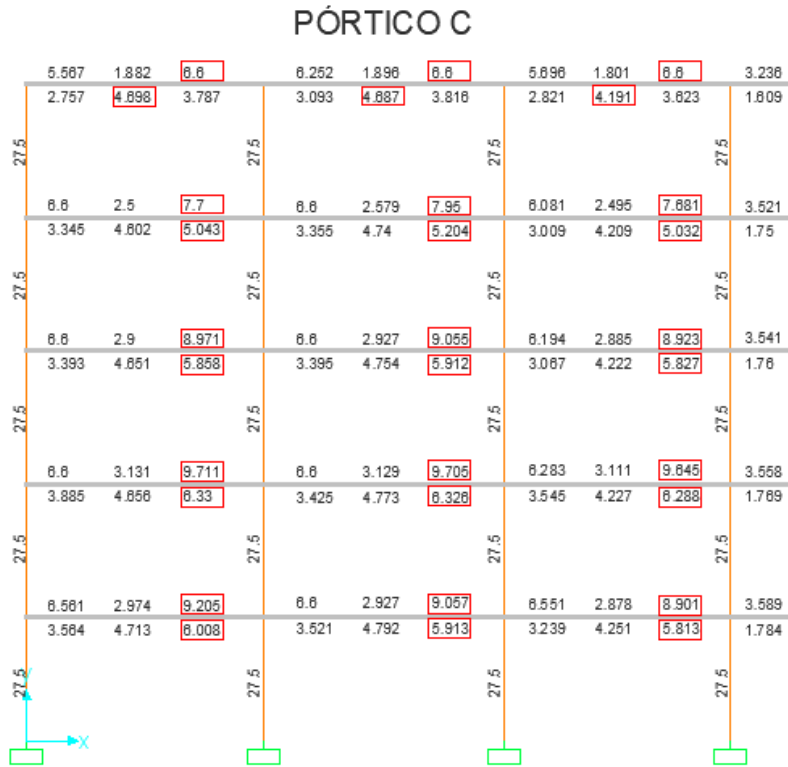


Figura 144. Diseño a flexión (As) pórtico C, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

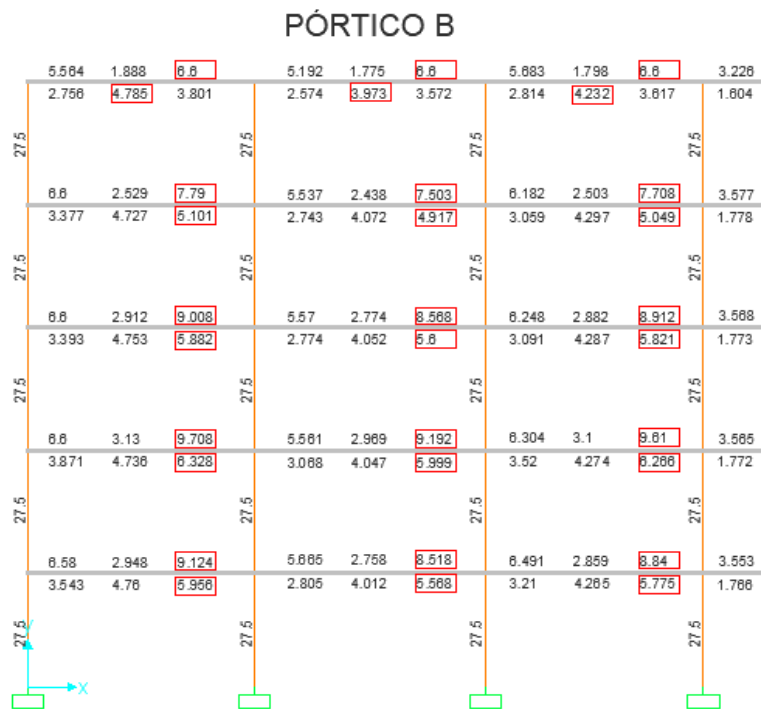


Figura 145. Diseño a flexión (As) pórtico B, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en

SAP 2000 20.

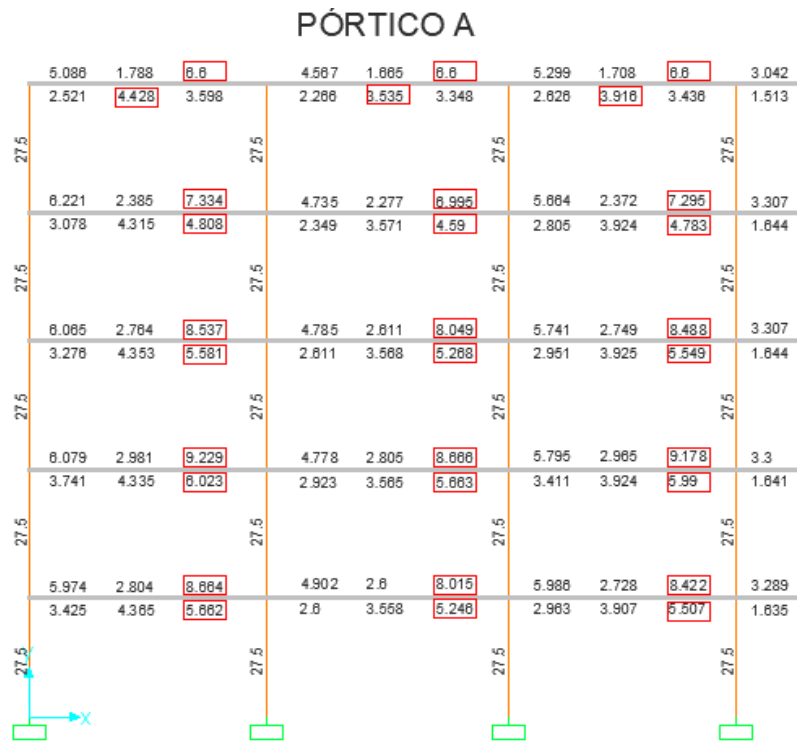


Figura 146. Diseño a flexión (As) pórtico A, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

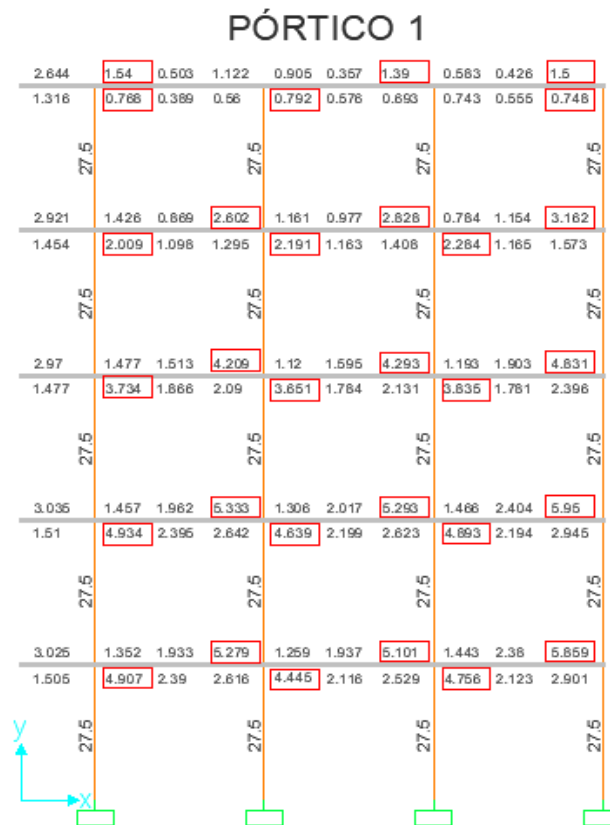


Figura 147. Diseño a flexión (As) pórtico 1, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

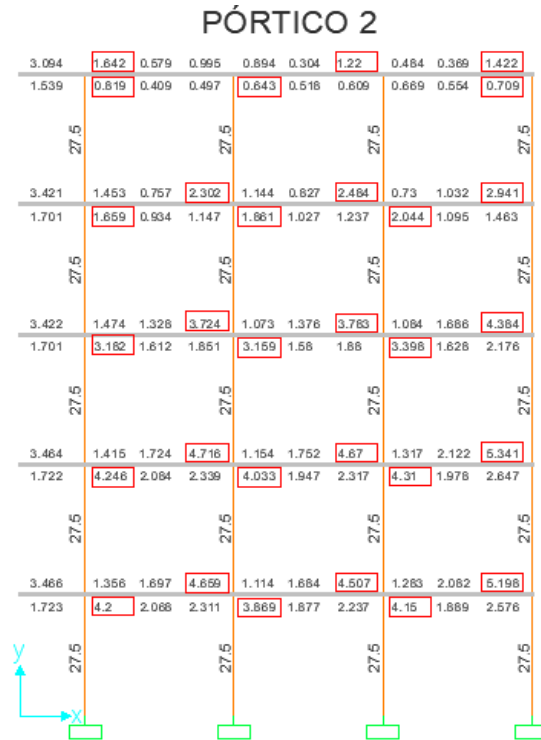


Figura 148. Diseño a flexión (As) pórtico 2, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

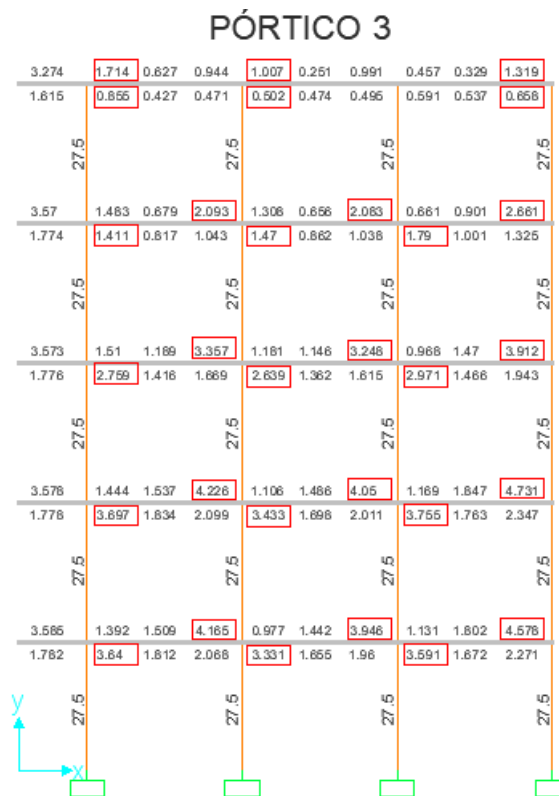


Figura 149. Diseño a flexión (As) pórtico 3, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.



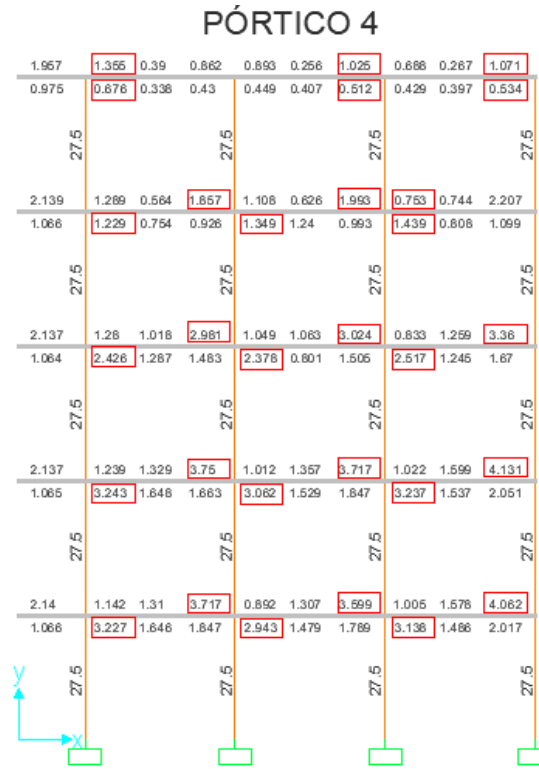


Figura 150. Diseño a flexión (As) pórtico 4, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

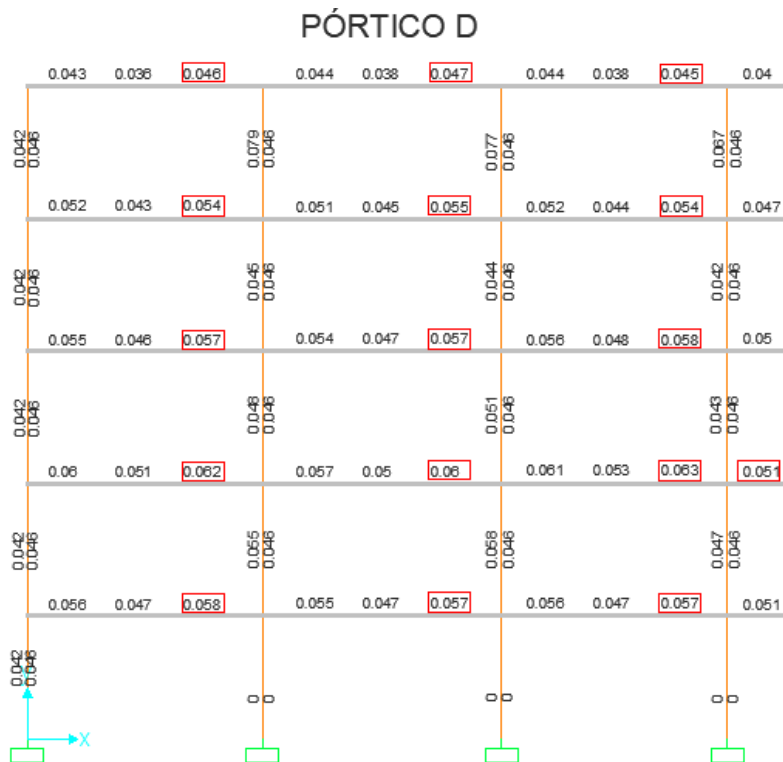


Figura 151. Diseño a Cortante (Av/S) pórtico D, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000 20.

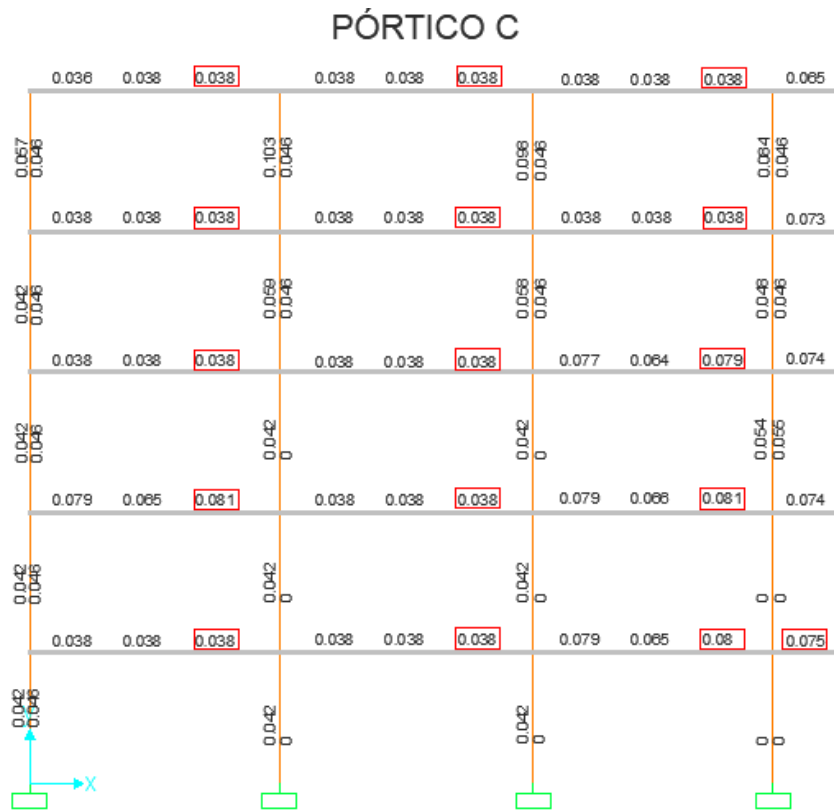


Figura 152. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico C, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.

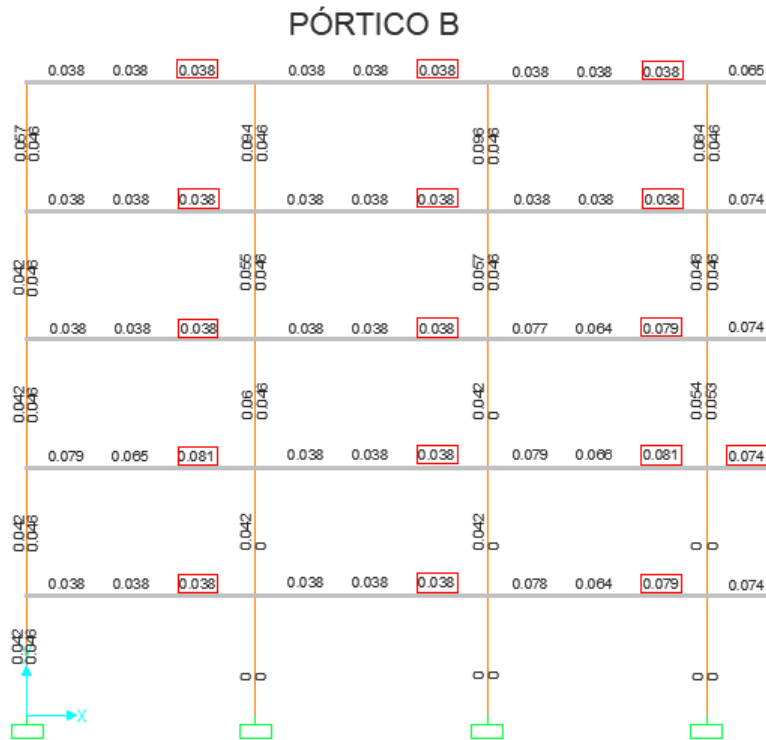


Figura 153. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico B, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.

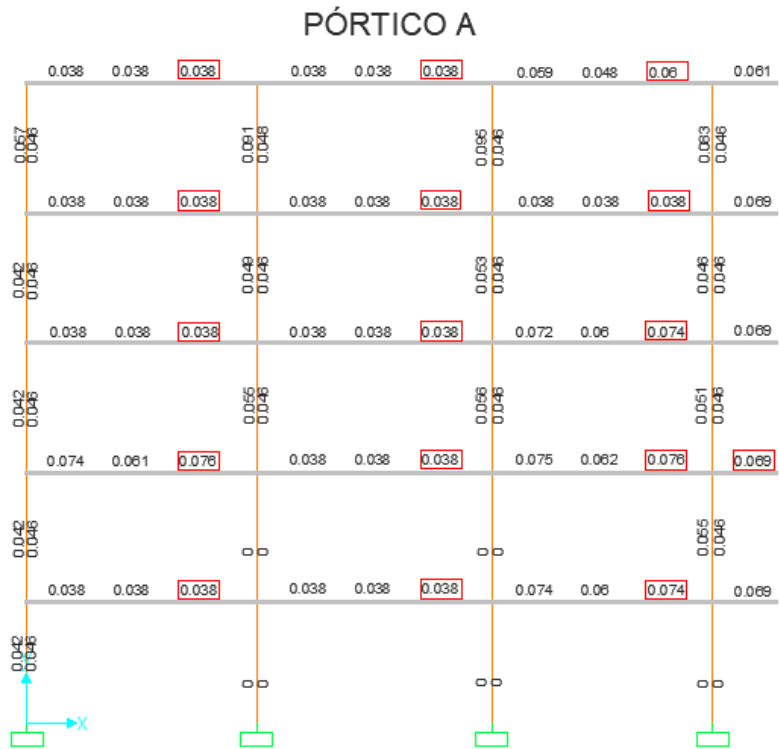


Figura 154. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico A, combinación 1.2D+IL+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.

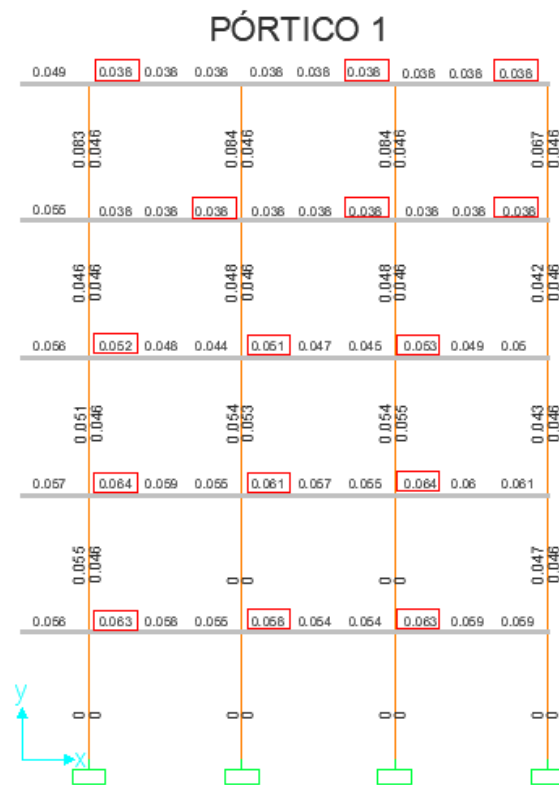


Figura 155. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico 1, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.



Figura 156. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico 2, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.



Figura 157. Diseño a Cortante ( $A_v/S$ ) pórtico 3, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.

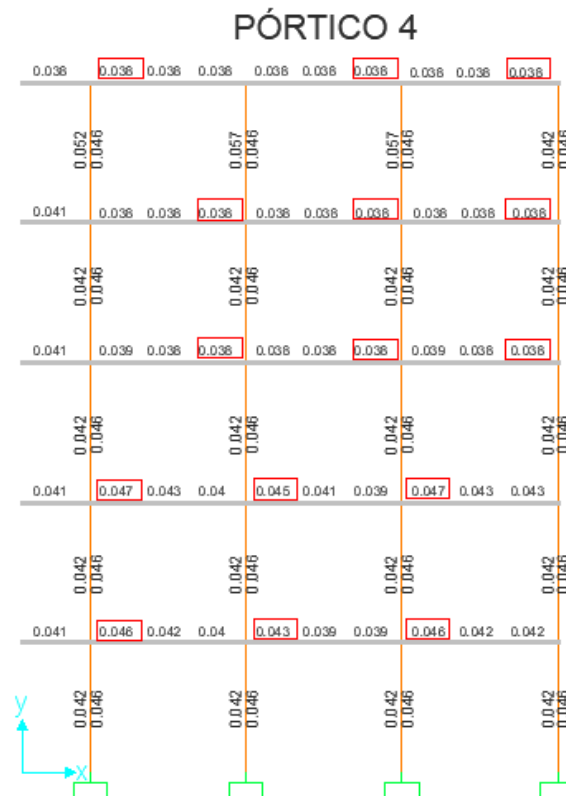


Figura 158. Diseño a Cortante (Av/S) pórtico 4, combinación 1.2D+1L+1EX. Elaboración propia en SAP 2000.

### Anexo E. Estudio de Suelos.

#### TRABAJO DE CAMPO

Ejecución de cuatro (4) sondeos hasta la profundidad de 8m y 10m.

En cumplimiento del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente

NSR-10, se realizaron los siguientes ensayos de campo:

- Ensayo de Penetración Estándar (SPT) Norma AS TM D 1586, I.N.V.E. 111.
- Extracción de muestras de suelo.
- Descripción visual de muestras a partir de los siguientes criterios: Litología, Textura, Tamaño de los granos, Minerales presentes, Estructura, Color, Presencia de materiales orgánicos y raíces, Consistencia o densidad relativa y demás características que permitan una descripción completa de la muestra de suelo.

- Determinación del nivel freático utilizando el criterio de humedad sensitiva al tacto durante el tiempo de realización del estudio.
- Ensayos de Penetración Estándar SPT. Se realizaron ensayos de penetración estándar utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111.
- Peso del martillo: 140 libras
- Altura de caída: 76 centímetros
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6")
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12")
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm
- Longitud del tubo: 75 centímetros
- Sistema de hincado: Malacate y polea
- Motor del equipo: B & S de 16 HP
- Criterio de Rechazo: Más de 50 golpes para 15 centímetros (6").

### **CONDICIONES DE LOS SUELOS**

Los registros stratigráficos hallados, confirman la presencia de los sedimentos típicos del cuaternario, concordando con los resultados de las perforaciones de los sondeos en el Perfil Superficial y de suelos friccionantes en los estratos inferiores, bajos de cohesión y más o menos granulometría regular o uniforme.

En términos generales y haciendo abstracción de pequeñas variaciones locales, el perfil superficial de suelos presenta características de amplia uniformidad, toda vez que la totalidad de los sondeos ejecutados muestran una terraza fluvial a

manera de arenas de densidad relativa media, con color predominante gris. Sobre esta terraza fluvial se ubican limos y arcillas. El análisis de los resultados de la exploración y ensayos de laboratorio, permiten establecer las siguientes características geotécnicas:

- a. El contenido de humedad natural a lo largo del perfil explorado tiende a ser alto, pero sensiblemente inferior al límite plástico de las muestras ensayadas.
- b. En general, los análisis granulométricos muestran suelos de tipo granular en los estratos inferiores con un contenido de arenas variable superior en muchos de las muestras al 90% conformando un estrato de firmeza media.

La resistencia al corte "in-situ" medida tomada de la cantidad de golpes para penetrar el suelo, en el estrato arcilloso encontrado (sondeos 1 y 4 cota 23 a 22), corresponde a una consistencia en general firme ( $1.0 < q_u < 2.0 \text{ Kg/cm}^2$ ). Ver Tabla siguiente, Consistencia de los suelos cohesivos, según Teng.

Como parámetros y propiedades dinámicas teóricas, podrán considerarse las siguientes:

Velocidad de onda sísmica: .....  $V_s = 50 (N)^{1/2} = 390,15 \text{ m/s}$ ; para un N promedio de 17 golpes/pie.

**Tipo de suelo:** C (Tabla A.2.4-1 NSR-10, título A).

**Tabla 61.***Clasificaciones de suelos para diseño de estructuras*

**Tabla A.2.4-1**  
**Clasificación de los perfiles de suelo**

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$ , o $\bar{\sigma}_u \geq 100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$ , o $100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > $\bar{\sigma}_u \geq 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180$ m/s > $\bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total <b>H</b> mayor de 3 m de arcillas blandas	<b>IP</b> > 20 <b>w</b> $\geq 40\%$ $50$ kPa ( $\approx 0.50$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > $\bar{\sigma}_u$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo <b>F</b> requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: <b>F<sub>1</sub></b> — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. <b>F<sub>2</sub></b> — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( <b>H</b> > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). <b>F<sub>3</sub></b> — Arcillas de muy alta plasticidad ( <b>H</b> > 7.5 m con Índice de Plasticidad <b>IP</b> > 75) <b>F<sub>4</sub></b> — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( <b>H</b> > 36 m)	

*Nota. El valor correspondiente de  $V_s$ (m/s) aplica para un suelo tipo C. Tomado de Fuente: NSR, (2010).*