

BARRO 7

INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA U Z

PLIEGUES Y FALLAS

ESIAZ
ING. CARLOS GARCÍA ROMERO
UNIDAD PROFESIONAL DE
ZACATENCO, MÉXICO.
MAYO, 2020



1.- INTRODUCCIÓN

Los temas tratados en estos apuntes son los necesarios para el estudio de la materia de Mecánica de Rocas que actualmente se imparte en la carrera de Ingeniería Civil en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional.

2.- CONCEPTOS

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Es la rama de la Geología que estudia e interpreta la geometría de las masas deformaciones rocosas, su fracturamiento, su posición espacial y su probable comportamiento. Las deformaciones rocosas pueden ser originadas por la subducción de las placas tectónicas o por esfuerzos desarrollados en la corteza terrestre, como son la compresión, tensión, torsión y cortante, o bien una combinación de ellos que asociados a la estratigrafía y a las características mecánicas de la roca, a través del tiempo, logran modificar su geometría y/o romper la roca.

RUMBO

Es la orientación magnética de la intersección entre un plano horizontal y la superficie de una capa o superficie inclinada de roca. Se mide con una brújula en los cuadrantes Norte - Este, Norte - Oeste, Sur - Este y Sur - Oeste, sus magnitudes varían de 0° a 90° .



FUENTE: LECIRE

FIGURA 1.- BRÚJULA BRUNTON



Las lecturas se pueden tomar en el espejo por esta razón la disposición del Este y Oeste están cambiadas.

AZIMUT

Ángulo que define la intersección entre un plano horizontal y la superficie de una capa o superficie inclinada de roca, medido a partir del Norte magnético. Se mide con una brújula de 0° a 360°.

ECHADO REAL

Inclinación de la pendiente máxima de la capa o superficie de la roca, medida de manera perpendicular a su rumbo.

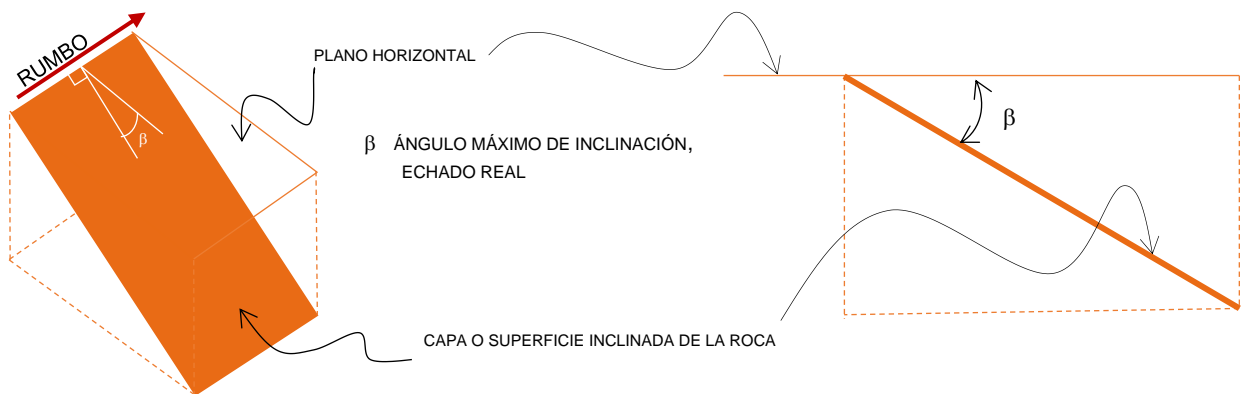
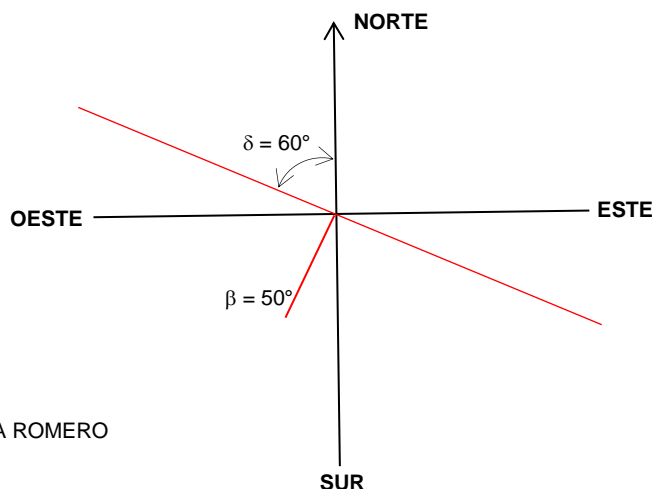


FIGURA 2.- RUMBO Y ECHADO O BUZAMIENTO

FORMAS DE REPORTAR LA ORIENTACIÓN DEL RUMBO Y EL ECHADO Y SUS MAGNITUDES

Se recomienda en lo general, la orientación de la capa representarla por una línea recta larga a fin de poder medir a partir de ella, y el echado con una línea corta, perpendicular a la anterior indicando el valor del echado. Por ejemplo, supóngase, rumbo 60° NW; echado 50° SW:





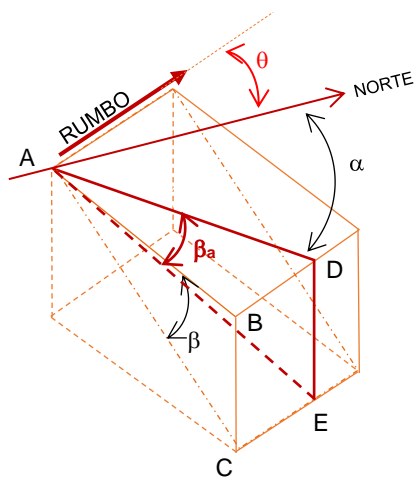
La información anterior se puede reportar como sigue:

- Midiendo el azimut de la dirección del echado, $210^\circ/50^\circ$
- Midiendo el azimut del rumbo de la capa, $120^\circ/50^\circ$ SW o $300^\circ/50^\circ$ SW
- Midiendo el rumbo de la dirección de la capa, $N60^\circ W / 50^\circ$ SW o $S60^\circ E / 50^\circ$ SW

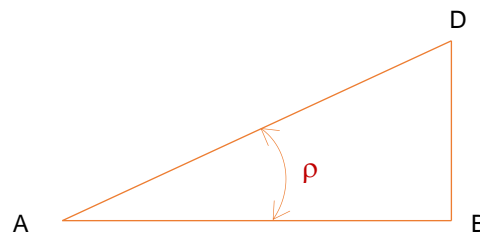
En estos apuntes se considerará la primera forma.

ECHADO APARENTE

Si el echado medido no es perpendicular a la dirección de la capa o rumbo, el valor registrado será menor al echado real y se denomina “echado aparente”



- β_a ÁNGULO MEDIDO EN UNA DIRECCIÓN NO PERPENDICULAR AL RUMBO, ECHADO APARENTE
- β ÁNGULO MEDIDO PERPENDICULAR AL RUMBO, ECHADO VERDADERO
- θ DIRECCIÓN DE LA CAPA
- α DIRECCIÓN DEL BUZAMIENTO



$$\tan \beta = BC / AB; BC = AB \tan \beta$$

$$\tan \beta_a = DE / AD; DE = BC$$

$$\cos \rho = AB / AD; AD = AB / \cos \rho$$

$$\tan \beta_a = BC / AD = AB \tan \beta \cos \rho / AB$$

$$\tan \beta_a = \tan \beta \cos \rho$$

FIGURA 3.- ECHADO APARENTE



DEFORMACIONES

Considérense que se cuenta con dos elementos, uno elástico, y otro viscoso cuyo comportamiento se representa por las gráficas siguientes:

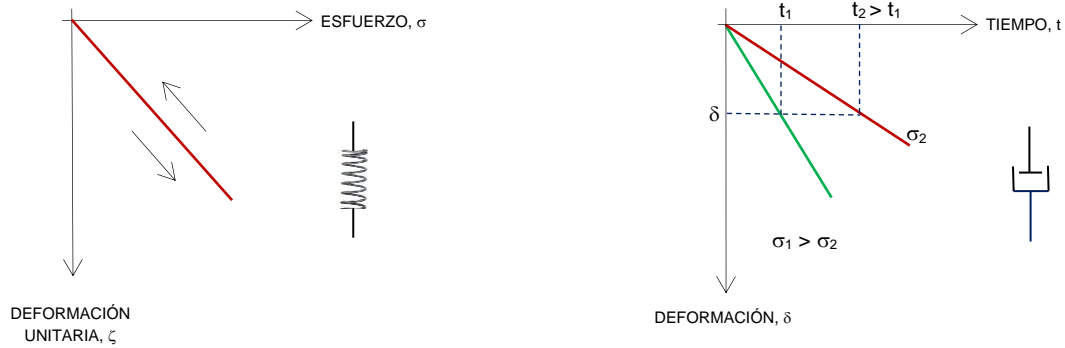


FIGURA 4.- ELEMENTOS DE HOOKE Y NEWTON

La primera gráfica corresponde al modelo de R. Hooke, en el cual la elasticidad es lineal y se considera que permanece lineal. La deformación es directamente proporcional al esfuerzo. La deformación unitaria, $\Delta\zeta$, es proporcional al esfuerzo, según su módulo de elasticidad, E.

$$E = \Delta\sigma / \Delta\zeta; \Delta\zeta = \Delta\sigma / E$$

Habrá que recordar que la elasticidad es una propiedad independiente del tiempo, es decir los cuerpos al ser cargados inmediatamente se deforman y al ser descargados, también inmediatamente recuperan su forma original. Los cuerpos o la materia puede poseer o no ésta propiedad. En este caso la roca es o no es elástica. Es incorrecto considerar que tiene poca o mucha elasticidad.

Para su cuantificación se tiene el módulo de elasticidad.

La segunda gráfica representa la viscosidad lineal con un modelo de Newton. Al aplicar el esfuerzo σ_1 se alcanza cierta deformación en un tiempo t_1 . Si se disminuye la magnitud del esfuerzo, la misma deformación se podrá alcanzar pero en un tiempo mayor.

Existe otro modelo que corresponde al de Ch. A. Coulomb, se trata de la plasticidad. Al igual que la elasticidad es independiente del tiempo. Los cuerpos al ser cargados se deforman inmediatamente y al ser descargados se quedan deformados, no existe el rebote elástico o la recuperación.

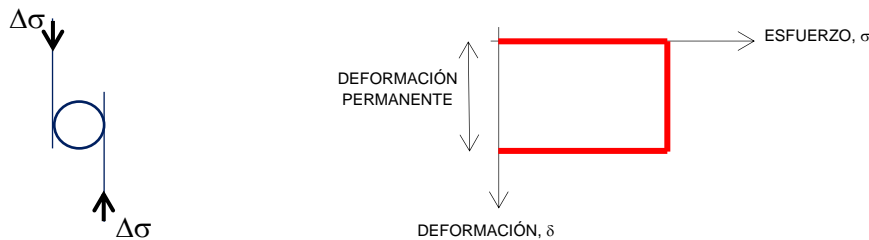


FIGURA 5.- ELEMENTO DE CH. A. COULOMB PARA LA FRICCIÓN



Al colocar en serie los modelos de Hooke y de Newton se obtiene la siguiente gráfica y ecuaciones constitutivas:

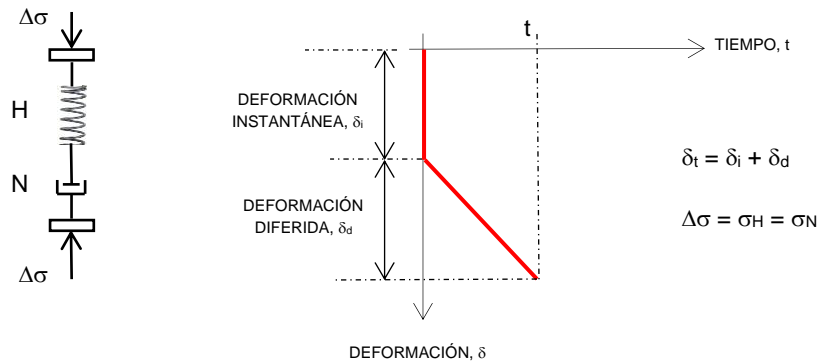


FIGURA 6.- ECUACIONES CONSTITUTIVAS ELEMENTOS DE HOOKE Y NEWTON EN SERIE

Al cargar el modelo, inmediatamente se deforma el resorte, δ_i , a medida que pasa el tiempo el amortiguador, elemento N, se desplaza. Los esfuerzos en los elementos H y N son iguales y, la deformación total es la suma de las deformaciones inicial y diferida.

Si ahora, los mismos elementos son colocados en paralelo, se tiene el modelo de Kelvin:

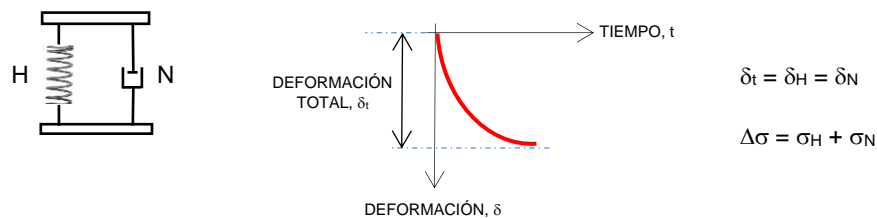


FIGURA 7.- ECUACIONES CONSTITUTIVAS PARA EL MODELO DE KELVIN

Siendo los mismos elementos, el comportamiento es completamente diferente, en este caso la elasticidad es retardada por el elemento viscoso.

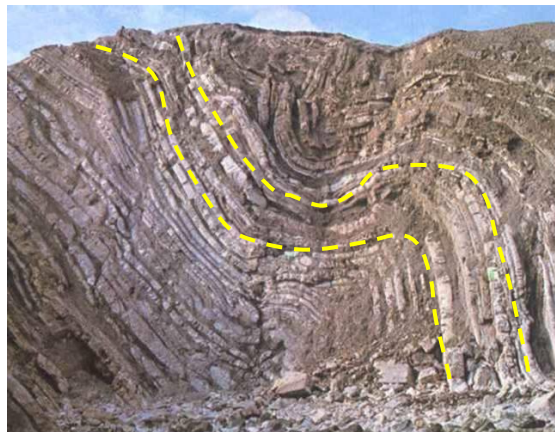


FIGURA 8.- ISOCLINAL, SINCLINAL Y ANTICLINAL.



En las rocas al ser comprimidas o tensionadas, a través mucho tiempo se presentan deformaciones sin llegar a fallar desarrollando pliegues como el de las figuras 8 y 9.

Las rocas como los suelos y otros materiales presentan comportamientos elasto-plasto-viscosos, según sea la magnitud de las cargas o esfuerzos y su velocidad de aplicación.

3.- PLIEGUES Y FALLAS

PLIEGUES

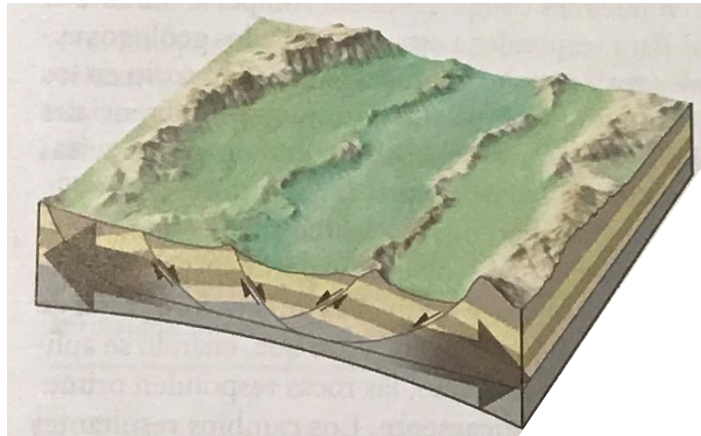
Las rocas al ser sometidas a esfuerzos durante mucho tiempo, pueden deformarse adquiriendo forma de ondulaciones. Generalmente son esfuerzos de compresión, tensión, de cortante o de cizalla y torsión los que modifican la corteza terrestre de diferentes formas.



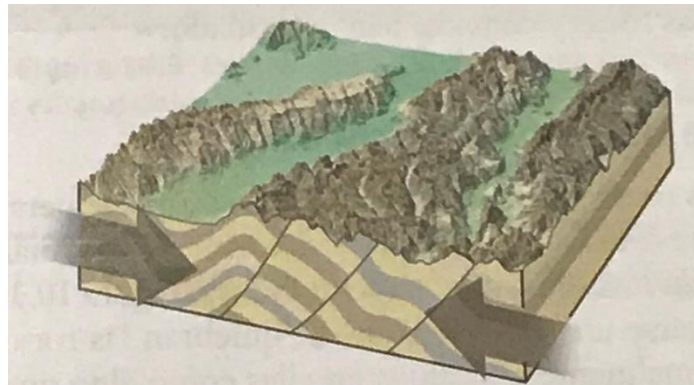
FIGURA 9.- PLIEGUES DE LA FORMACIÓN PIMIENTA, CONSTITUIDA POR CALIZAS Y LUTITAS, SIERRA NORTE DE PUEBLA.

Los esfuerzos de compresión pliegan la corteza terrestre formando cadenas montañosas, acompañado de fracturamiento y flujo de las rocas, dependiendo de la magnitud del esfuerzo y el tiempo de aplicación de dicho esfuerzo.

Cuando las placas tectónicas tienden a separarse, se generan esfuerzos de tensión que alargan la masa rocosa. En zonas de tensión no hay cadenas montañosas.



FUENTE: CIENCIAS DE LA TIERRA
FIGURA 10: ZONA DE TENSIÓN



FUENTE: E. J. TARBUCK Y F. K. LUTGENS, CIENCIAS DE LA TIERRA
FIGURA 11.- FORMACIÓN DE MONTAÑAS POR ESFUERZOS DE COMPRESIÓN

TIPOS DE PLIEGUES

SINCLINAL

Es un pliegue convexo, en el que las recientes formaciones quedan al centro. La concavidad es hacia arriba.

ANTICLINAL

La concavidad del pliegue es hacia abajo. Las formaciones más antiguas están en el centro.

HOMOCLINAL

En esta estructura las capas tienen un echado y rumbo constantes.

MONOCLINAL

Las capas son sensiblemente horizontales, pero en un cierto tramo el echado aumenta, para posteriormente continuar horizontal.

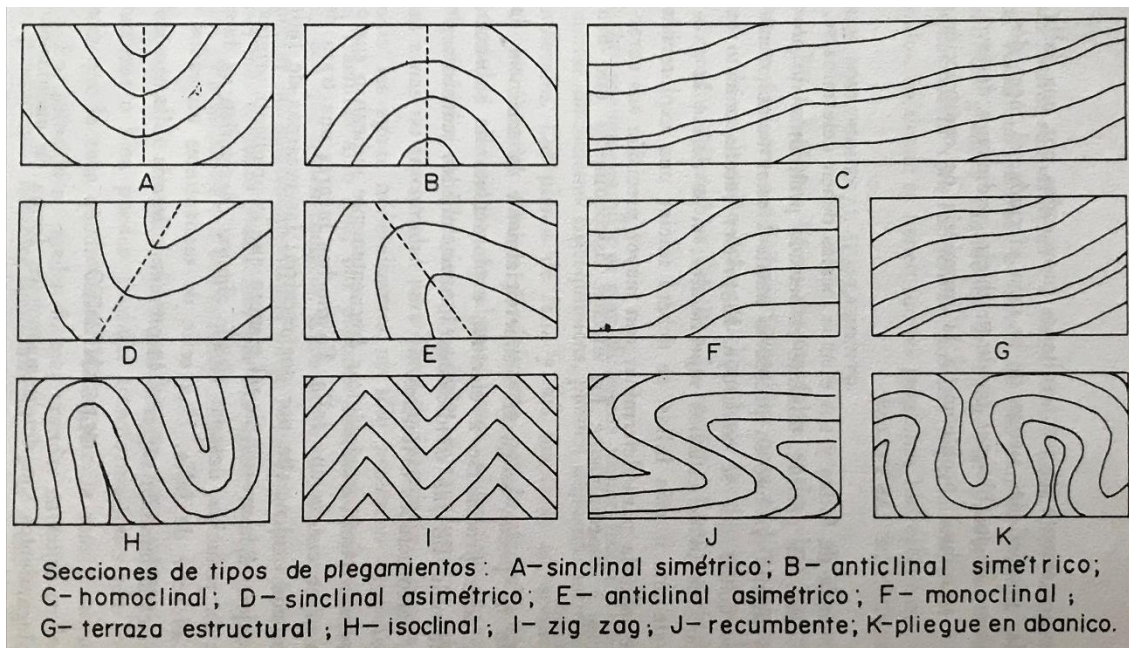
GEOANTICLINAL

Es una anticlinal de dimensiones continentales.

GEOSINCLINAL

Es un sinclinal de dimensiones continentales.

La siguiente figura muestra la geometría de algunos tipos de pliegues



FUENTE: J. B. PUIG, GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL Y FOTOINTERPRETACIÓN
 FIGURA 12.- TIPOS DE PLEGAMIENTOS

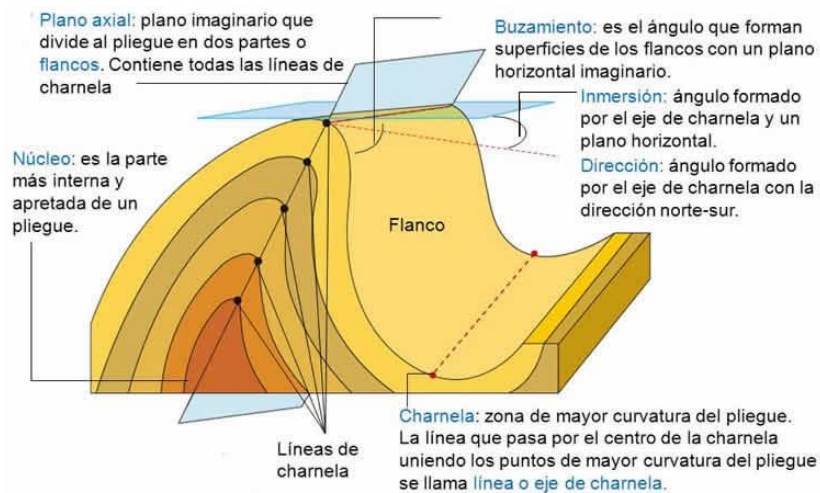


FIGURA 13.- ELEMENTOS QUE CONFORMAN LOS PLEGUES

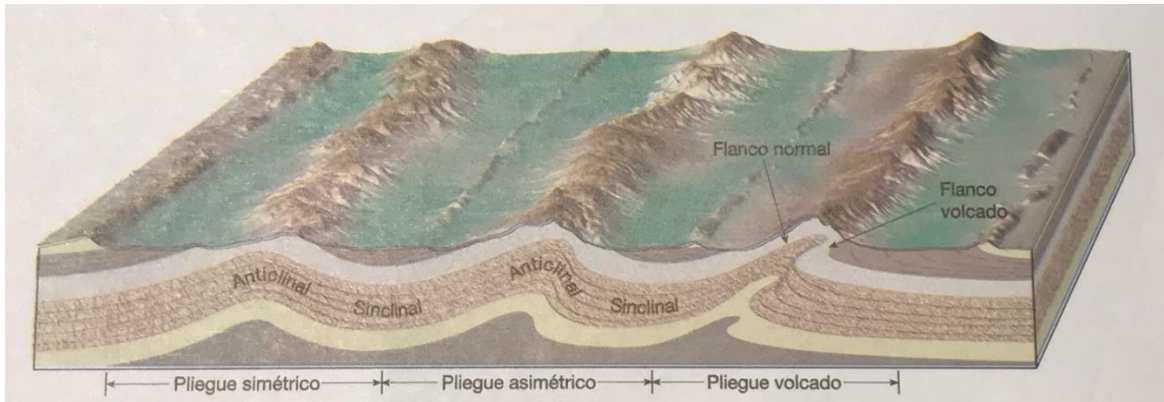


FIGURA 14.- SECCIÓN DE PLIEGUES, ANTICLINALES Y SINCLINALES CONSECUTIVOS COMPARTEN EL MISMO FLANCO
FUENTE: E. J. TARBUCK Y F. K. LUTGENS, CIENCIAS DE LA TIERRA

FALLAS

Considérese un macizo de roca fracturado, si no existe movimiento entre los bloques no es una falla.

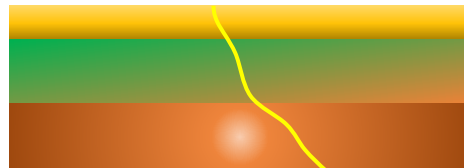


FIGURA 15.- MACIZO DE ROCA FRACTURADO

Falla es una fractura que ha experimentado algún movimiento relativo entre el suelo o macizo rocoso por los cuales pasa la fractura. Debido a la resistencia residual que pueden ofrecer tanto los suelos como las rocas ya fallados, los movimientos relativos entre el macizo o suelo fracturados pueden ser intermitentes aunque los esfuerzos, a través del tiempo, sean constantes. En ocasiones cuando súbitamente se vence la resistencia se puede llegar a generar sismos.

Si se presenta movimiento relativo entre los bloques, se tiene una falla.

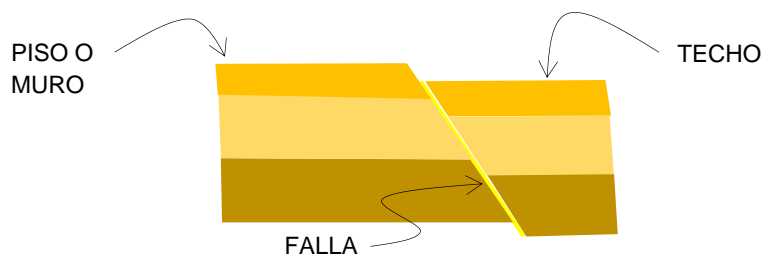


FIGURA 16.- ELEMENTOS DE UN FALLA



TECHO

Se define como “techo” al bloque que se ubica sobre la superficie de deslizamiento.

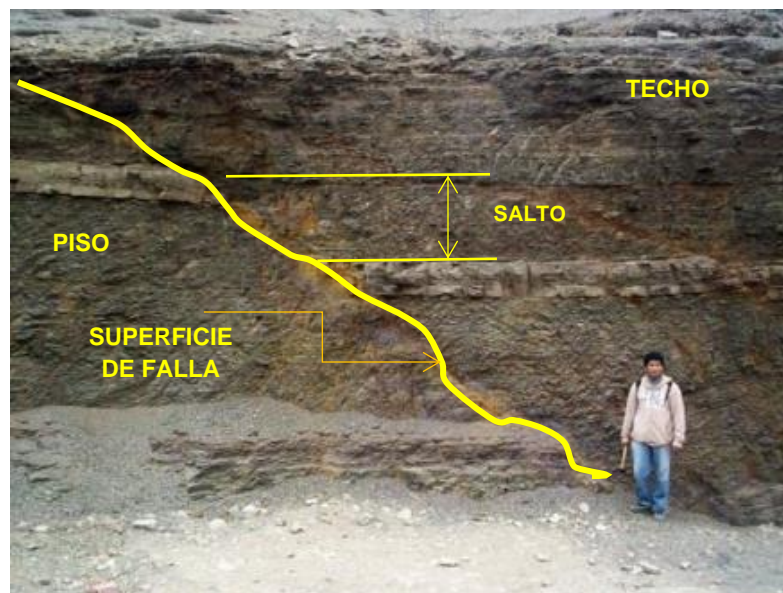
PISO O MURO

El “piso” o “muro” se ubica por debajo de la superficie de deslizamiento.

TIPOS DE FALLAS

FALLA NORMAL

El techo se desliza hacia abajo, respecto al “piso”, sobre la superficie de falla. Este tipo de falla generalmente es generada por esfuerzos de tensión.



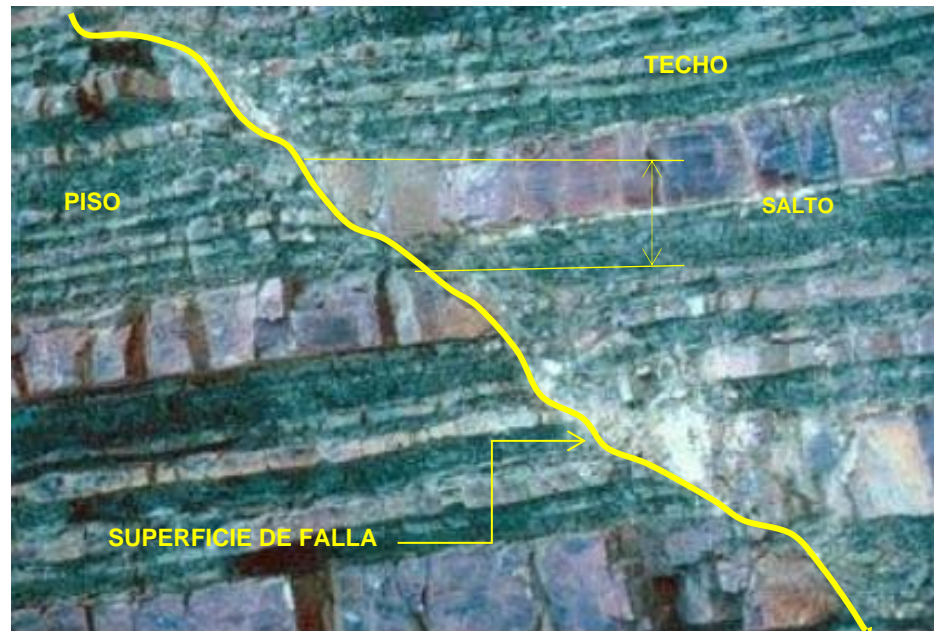
FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SÍSMICA
FIGURA 17.- MACIZO DE ROCA FRACTURADO. FALLA NORMAL

FALLA INVERSA

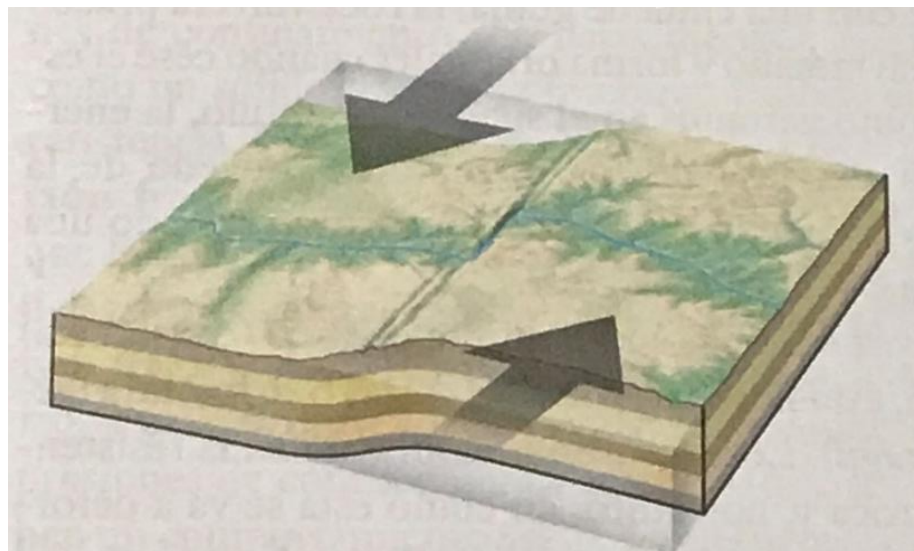
El “techo” se eleva respecto al piso. En este caso son los esfuerzos de compresión los responsables de este tipo de falla, figura 18.

FALLAS POR CORTANTE

Los esfuerzos cortantes en las zonas de falla generan desplazamientos. Un ejemplo clásico de este tipo de falla es el sistema de fallas de San Andrés, que abarca los estados de California, Estados Unidos y Baja California en México, figuras 19 y 20.



FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SÍMICA
FIGURA 18.- FALLA INVERSA



FUENTE: E. J. TARBUCK Y F. K. LUTGENS, CIENCIAS DE LA TIERRA
FIGURA 19.- LOS ESFUERZOS CORTANTES PROVOCAN DESPLAZAMIENTOS EN LA ZONA DE FALLA

El sistema de fallas, San Andrés, con longitud del orden de los 1,300 km, es el resultado de los desplazamientos relativos entre las placas Norteamericana y del Pacífico.

La Península de la Baja California se desplaza hacia el Norte, separándose del continente con una relación de 30 mm por año.



FIGURA 20.- LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE FALLAS DE LA FALLA SAN ANDRÉS



FIGURA 21.- SEÑALAMIENTO EN EL PUENTE POLE QUE "INDICA" EL CONTACTO ENTRE LAS PLACAS DEL PACÍFICO Y NORTEAMERICANA. NOTESE LA EXISTENCIA DE UN ARROYO.



FIGURA 22.- FALLA DE SAN ANDRÉS, JULIO DEL 2019, CALIFORNIA EEUU.



FIGURA 23.- FALLA EN LA CARRETERA TIJUANA - ENSENADA. PUBLICACIÓN DEL 29 DE DICIEMBRE DEL 2015
FUENTE: PERIÓDICO 4 VIENTOS.

LOCALIZACIÓN DE FALLAS

La localización de las fallas puede iniciarse con la recopilación de información documental publicada por los organismos como el INEGI y Servicio Geológico Mexicano, fotografías satelitales, etc. Posteriormente se efectuará un reconocimiento superficial y si es necesario se removerá la cobertura de suelo y se excavarán pozos a cielo abierto para descubrir la roca.



FIGURA 24.- EL TRAZO DE UNA FALLA PUEDE ESTAR SEÑALADO POR PAREDES EXPUESTAS, ARROYOS ALINEADOS O INCLUSIVE CASCADAS

Si la roca es estratificada, por los saltos entre estratos se podrá definir la existencia o no de fallas. Si el rumbo de la falla es paralelo a la estratificación y no está definido el salto, la identificación de la falla no es tan sencilla.

Si por el contrario, se presenta “falla espejo”, es decir la superficie de deslizamiento se muestra pulida, con estrías, habrá que deslizar suavemente la mano de manera paralela a las estrías, si el tacto en la superficie es áspero, es indicativo que el bloque sobre el que se desliza la mano se desplazó en la misma dirección del movimiento de la mano. Si por el contrario el tacto es suave, el bloque sobre el que se desliza la mano se movió en sentido contrario a la dirección de la mano. Habrá que tomar en cuenta los efectos de la meteorización sobre la superficie expuesta.

Otro indicio de movimiento entre las masas son la trituración y milonitación, pulverización, de la roca.

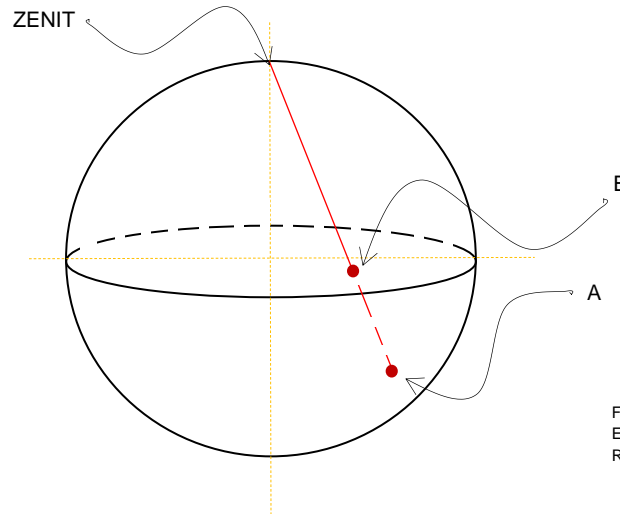
Como se cita en la figura 24, las paredes o escarpes, así como los arroyos alineados y las cascadas son evidencias de la existencia de fallas.

4.- PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS

Para el estudio de la estabilidad de taludes en rocas, básicamente se emplean dos tipos de proyecciones, “áreas iguales” y “ángulos iguales”, la primera se conoce como “Lambert” o “Schmit”, la cual es mayormente utilizada por geólogos. La segunda se reconoce como “Proyección Estereográfica” o de “Wulff” cuyo uso es preferido entre los ingenieros.

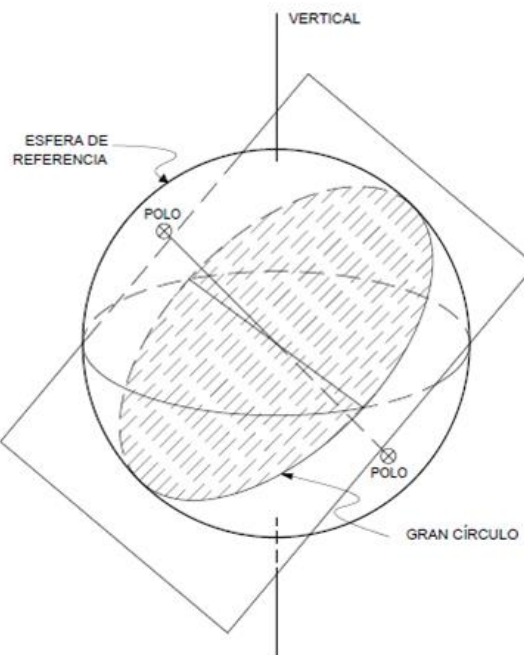


En la proyección de Wulff, consiste en que un punto A sobre de la superficie de la Tierra puede ser representado sobre del ecuador de una esfera por el punto B, como se indica en el siguiente dibujo:



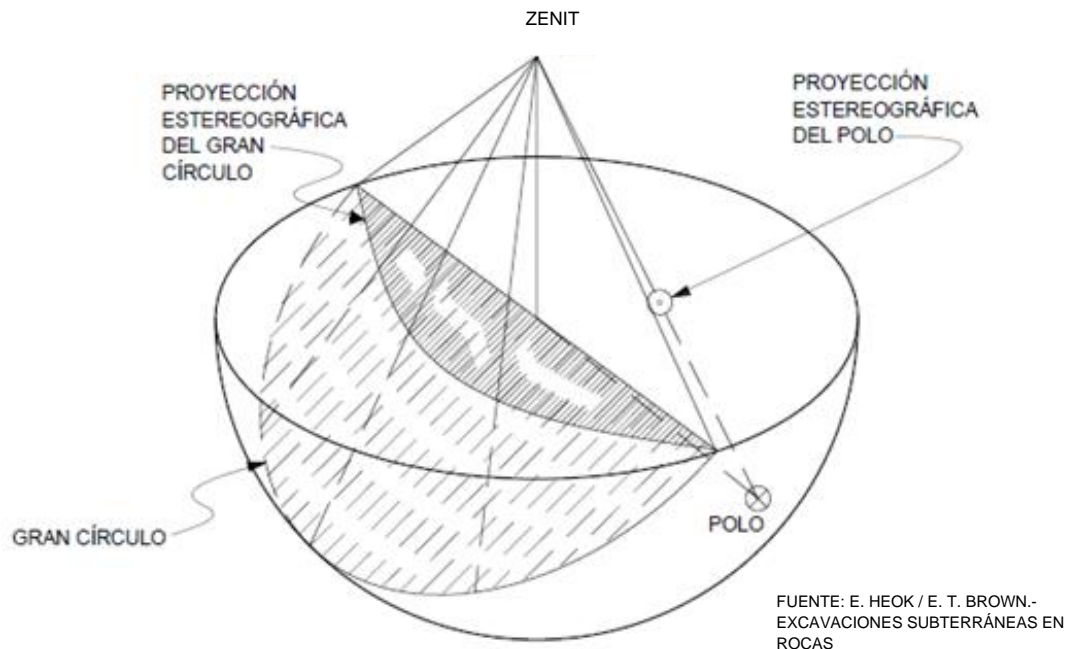
FUENTE: E. HEOK / E. T. BROWN.-
EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN
ROCAS

Considérese un plano con un determinado rumbo y echado, además se tiene una esfera se puede centrar sobre del plano como se muestra en la siguiente figura:



FUENTE: E. HEOK / E. T. BROWN.-
EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN
ROCAS

La intersección entre el plano y la esfera es representada por una superficie denominada “Gran Círculo”. Perpendicular al plano se tienen dos puntos diametralmente opuestos, “polos”. Como el gran círculo es simétrico al ecuador de la esfera, únicamente se trabaja con el hemisferio inferior. Así, la proyección del gran círculo a la superficie ecuatorial es la proyección estereográfica del gran círculo.



De esta forma se puede construir la red estereográfica de Wulff, figura 25, consultar “Geología Estructural” de Donal M. Regan, se encuentra en la biblioteca de la ESIA Z.

REPRESENTACIÓN DE UN PLANO EN LA RED ESTEREOGRÁFICA DE WULFF.

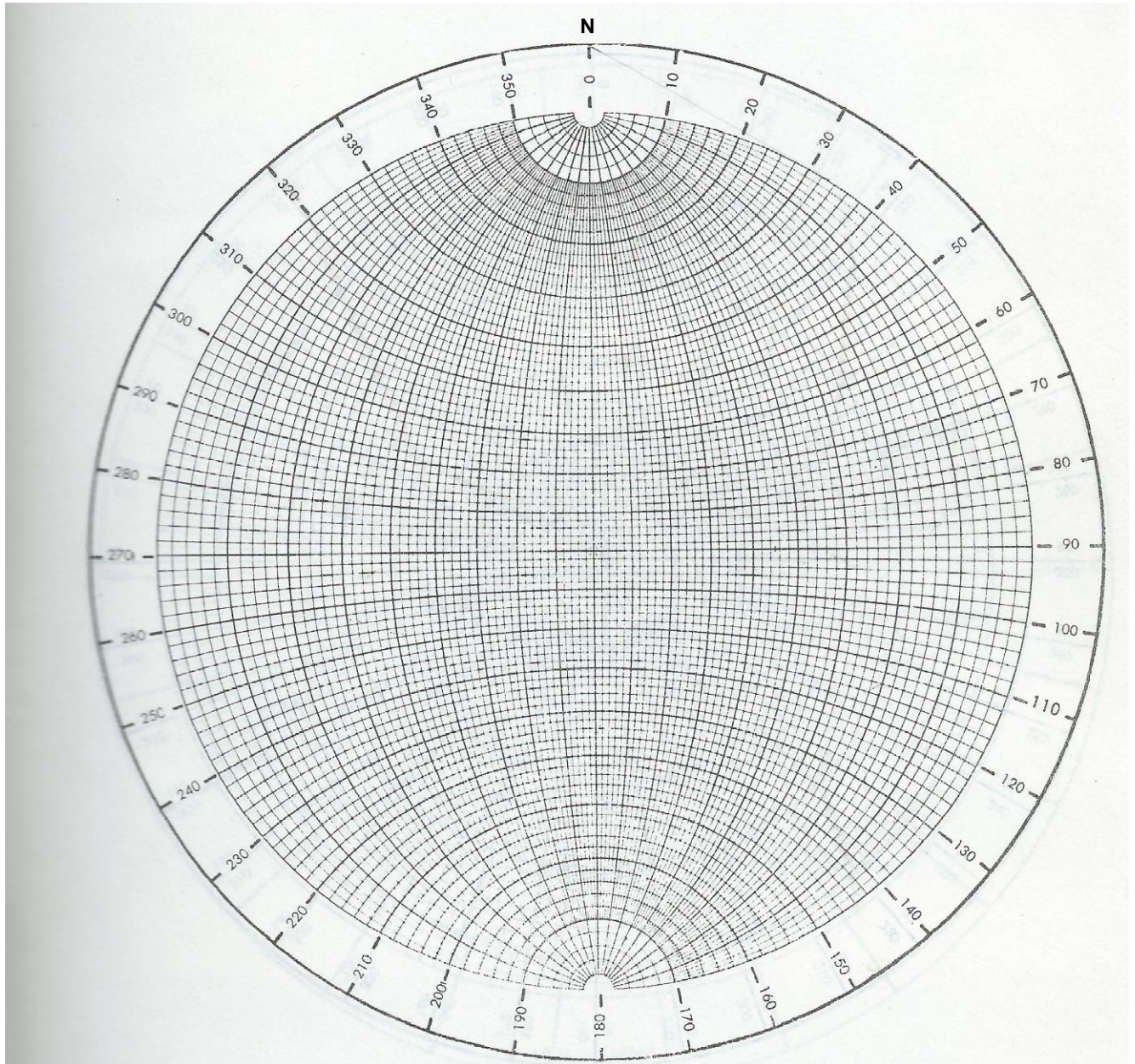
- 1.- Sobre la red de Wulff, colóquese papel transparente y márchese el Norte y el centro.
- 2.- Mídase el azimut del echado de la capa. Gire papel transparente a la izquierda o derecha hacia la dirección más próxima hasta que el echado coincida con el eje Este – Oeste.
- 3.- Ubique la magnitud del echado contando a partir del perímetro de la circunferencia hacia el centro de la red de Wulff. Sobre de ese meridiano dibuje el gran círculo.
- 4.- Localice el polo contando 90° hacia el centro de la red, a partir del gran círculo.

DETERMINAR EL BUZAMIENTO DE LA INTERSECCIÓN DE DOS PLANOS.

- 1.- Ubique los dos planos con el procedimiento descrito arriba.
- 2.- Gire el papel transparente hasta que la intersección de los dos círculos coincida con el eje Este – Oeste, los grados entre esta intersección y la circunferencia de la red define el buzamiento de la línea de intersección.
- 3.- Los polos de las capas se deberán ubicar en el mismo meridiano o gran círculo.



4.- Nuevamente haga coincidir los Nortes del papel con el de la red. Mida el buzamiento de la intersección contando los grados a partir del perímetro del círculo hacia el centro.



FUENTE E. HOEK / E. T. BROWN.- EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN ROCA
FIGURA 25.- RED ESTEREOGRÁFICA DE WULFF

EJEMPLO

Determinar la línea de intersección entre dos capas que se localizan en la corona de un talud, se reporta el azimut del echado y el echado verdadero:

Talud $315^{\circ}/60^{\circ}$



Capa A $258^{\circ}/40^{\circ}$
Capa B $23^{\circ}/60^{\circ}$

Las siguientes fotografías indican paso a paso la solución. Para indicar los ejes Norte – Sur y Este – Oeste, se pintaron de amarillo.

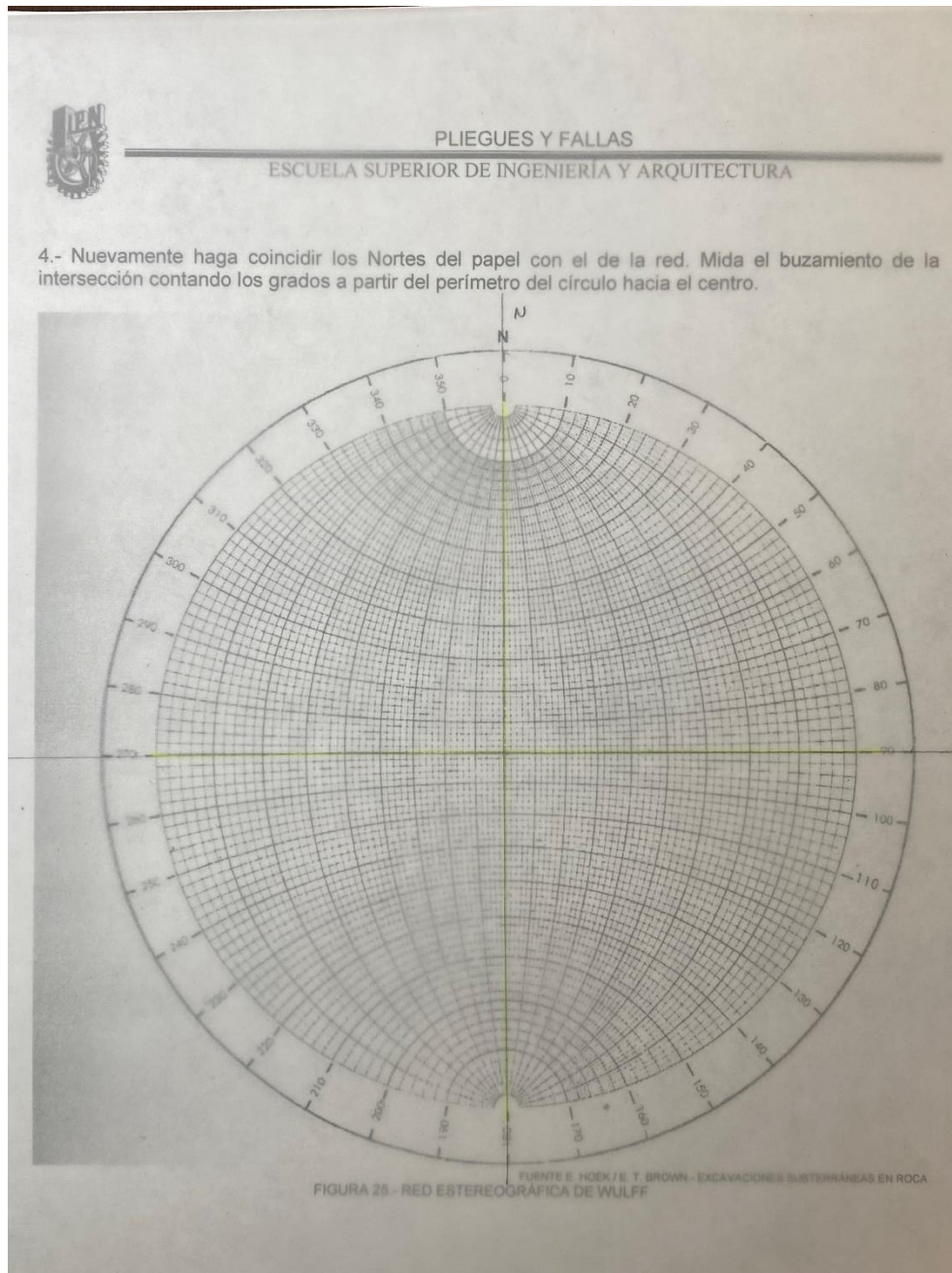


FIGURA 26.- SE HACEN COINCIDIR EL NORTE DE LA RED CON EL NORTE DE LA HOJA DE PAPEL TRANSPARENTE.

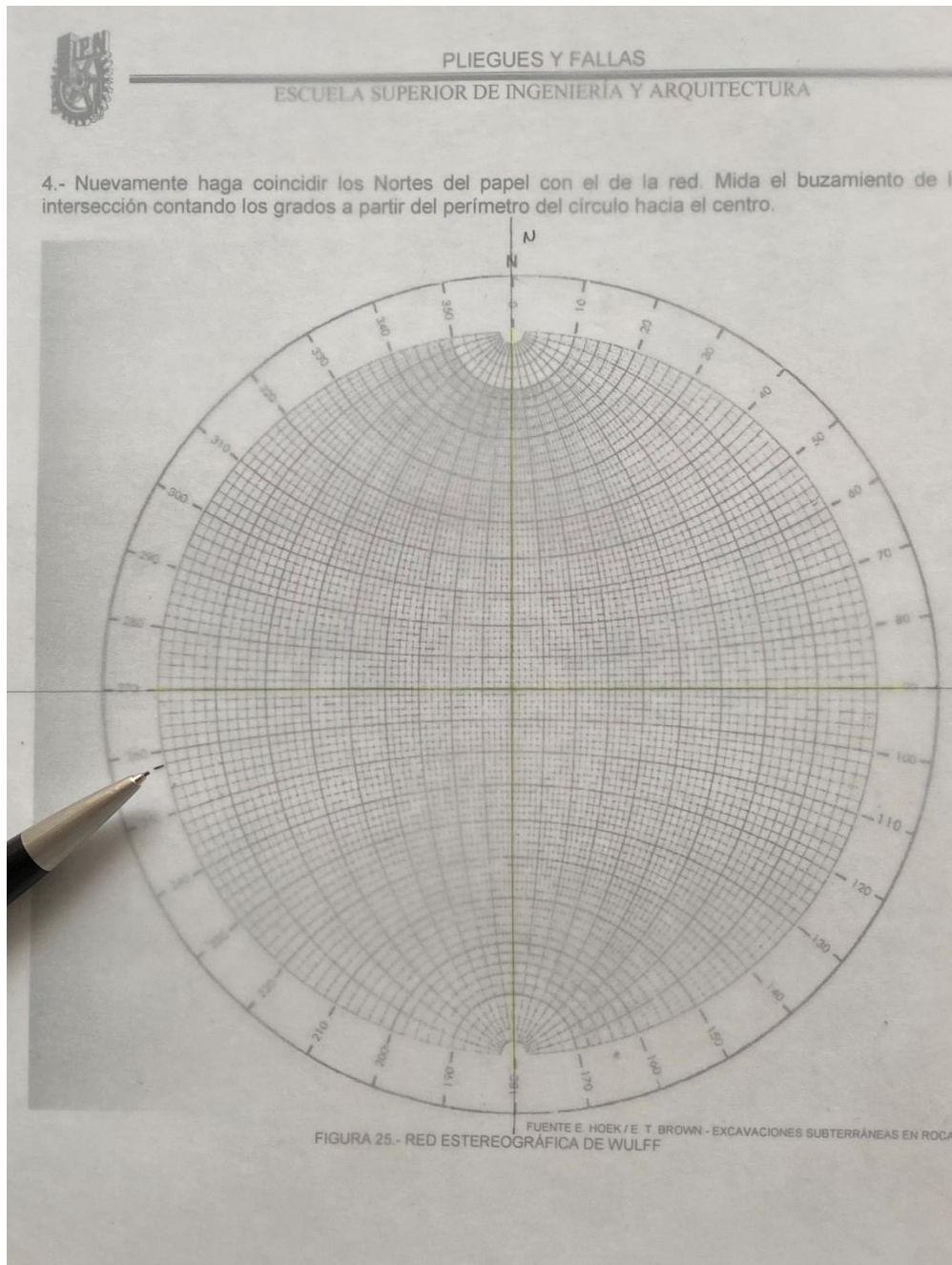


FIGURA 27.- SE MARCA EL AZIMUT DEL ECHADO DE LA CAPA A, 258°

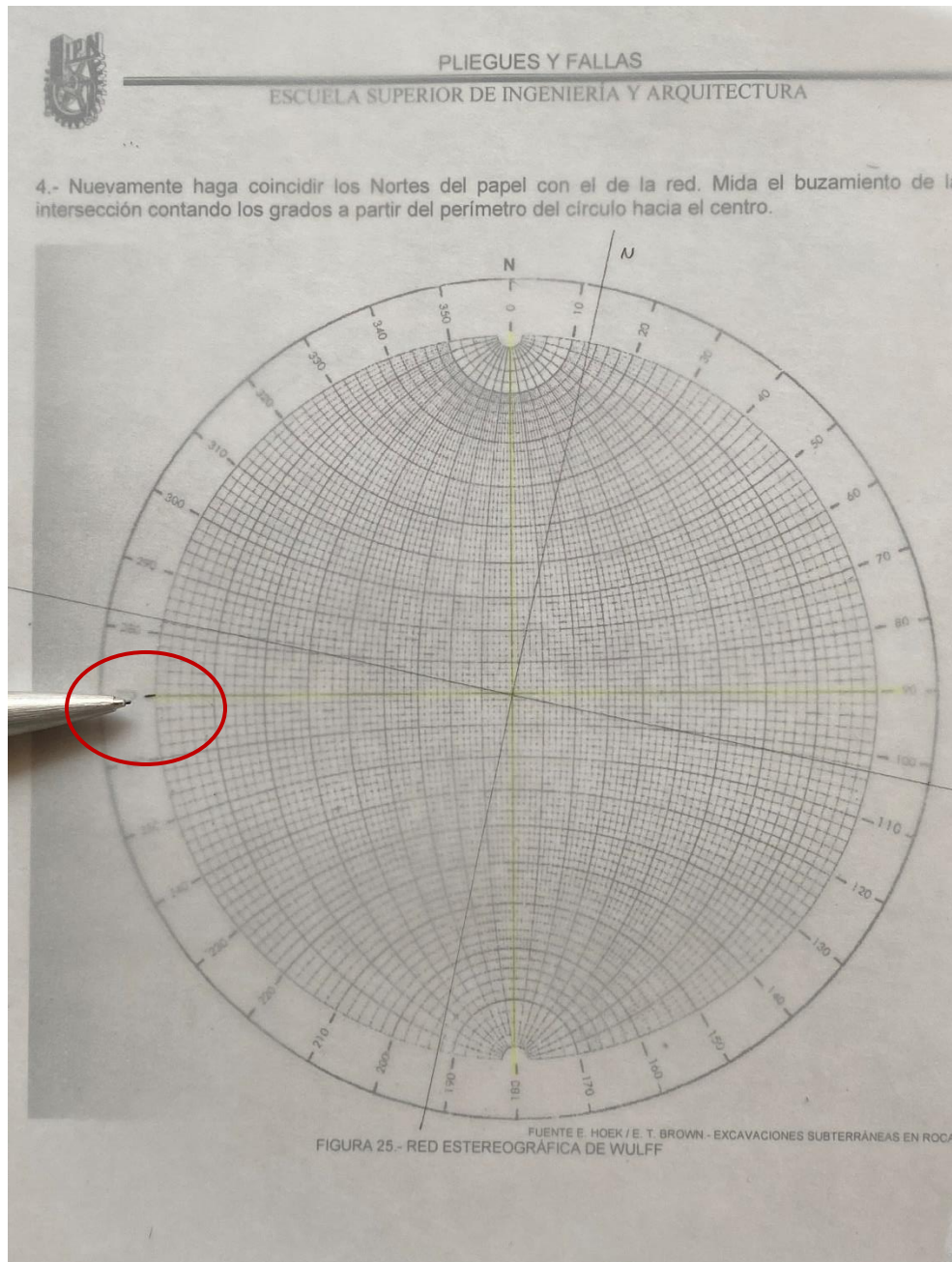


FIGURA 28.- LA MARCA DE LOS 258° SE HACE COINCIDIR CON EL EJE ESTE – OESTE

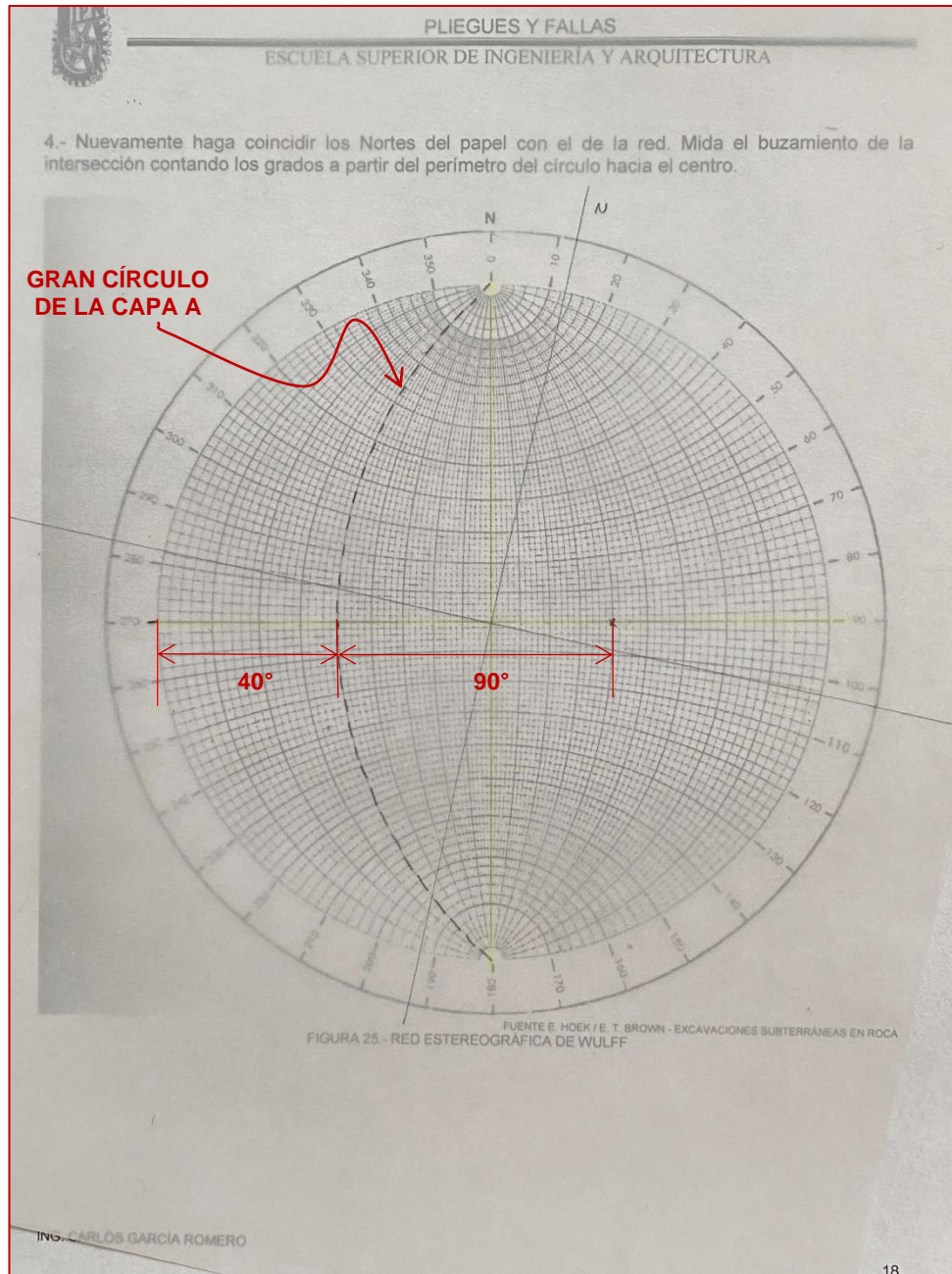


FIGURA 29.- SOBRE EL EJE ESTE – OESTE, SE MIDE EL ECHADO DE LA CAPA, 40°, Y SE TRAZA EL GRAN CÍRCULO. A PARTIR DEL ECHADO SE CUENTAN 90° PARA UBICAR EL POLO DE LA CAPA A

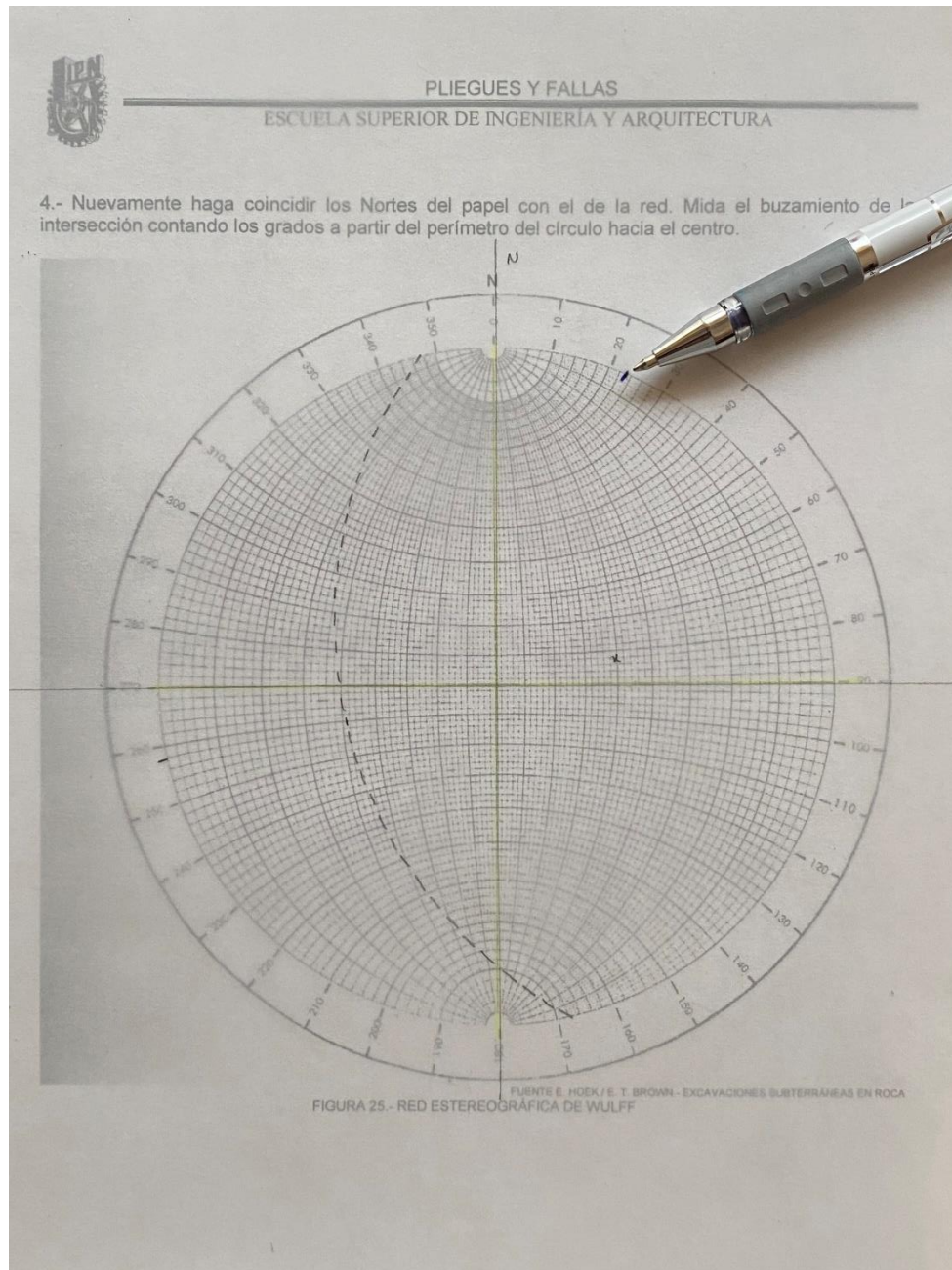


FIGURA 30.- PARA LA CAPA B, SE PROCEDE DE LA MISMA MANERA. SE LOCALIZA EL AZIMUT DEL ECHADO, 23°

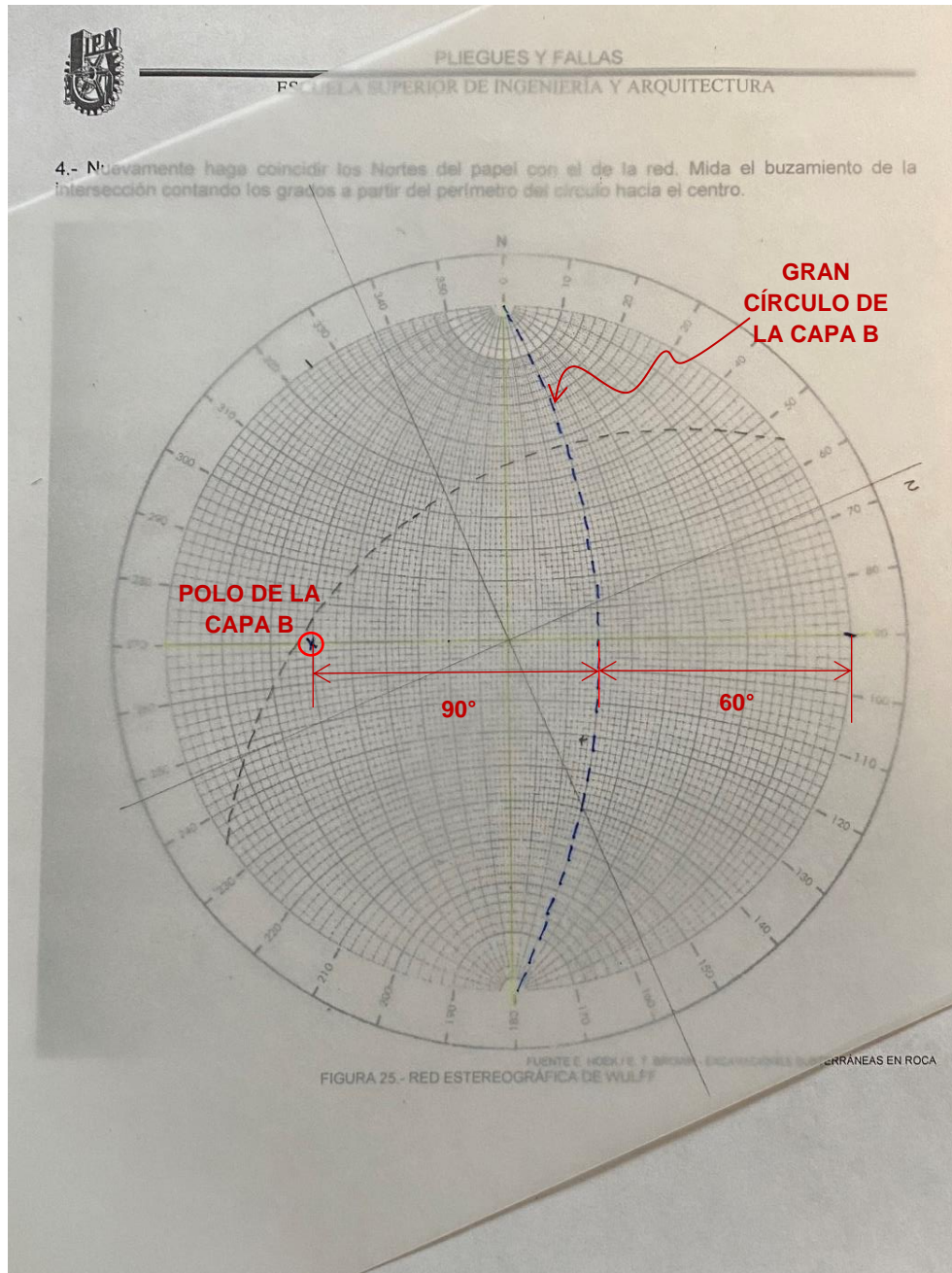


FIGURA 31.- PARA LOCALIZAR EL GRAN CÍRCULO DE LA CAPA B Y SU POLO, UBIQUESE EL AZIMUT, 23°, DE LA CAPA B SOBRE EL EJE ESTE -OESTE, CUENTESE EL ECHADO A PARTIR DE LA PERIFERIA DE LA RED Y POSTERIORMENTE OTROS 90° A PARTIR DEL GRAN CÍRCULO HACIA EL CENTRO DE LA RED PARA UBICAR EL POLO.

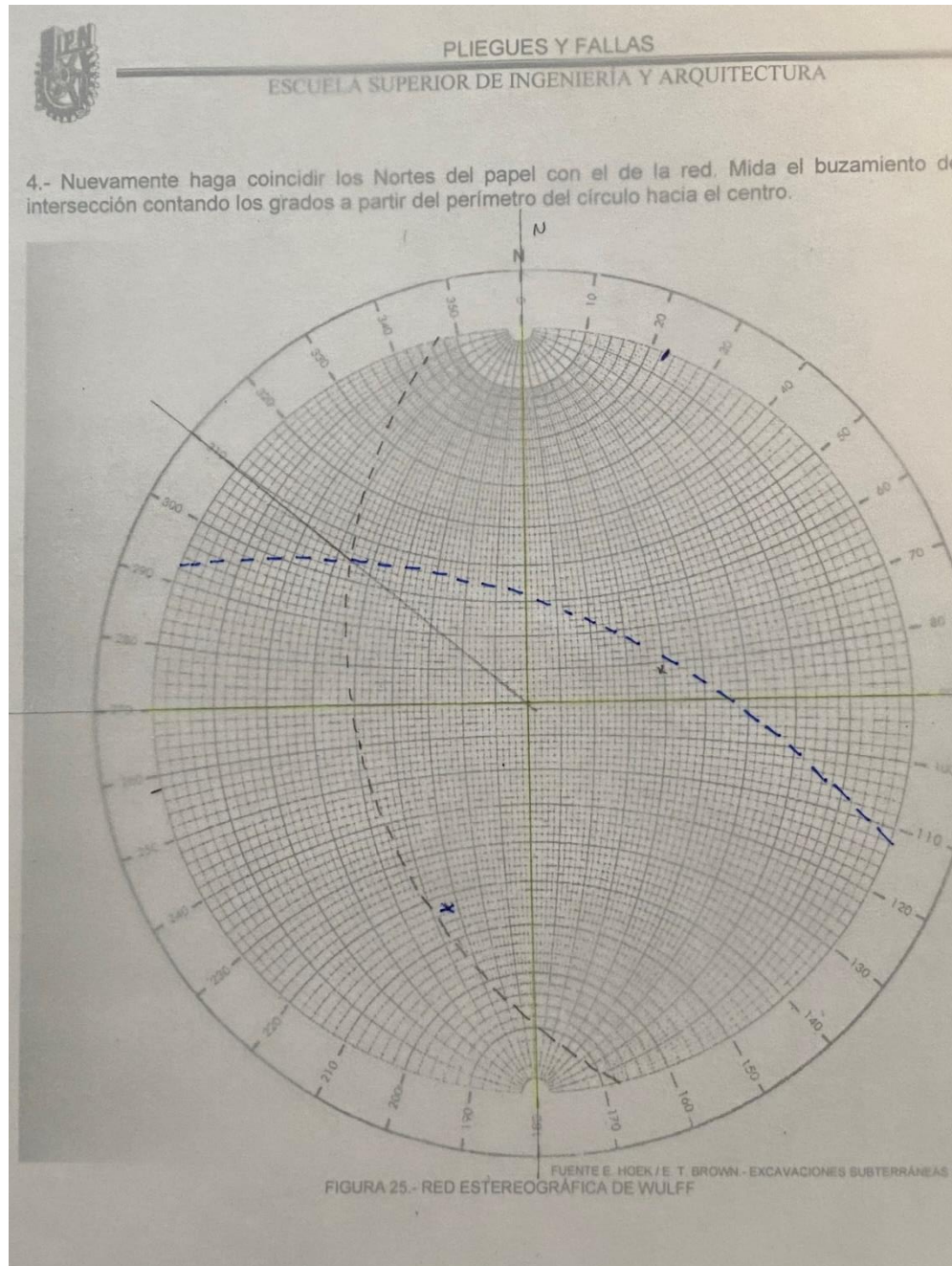


FIGURA 32.- HAGA COINCIDIR LOS NORTES DE LA RED Y DEL PAPEL TRANSPARENTE, LA INTERSECCIÓN TENDRÁ UN AZIMUT DE 310°

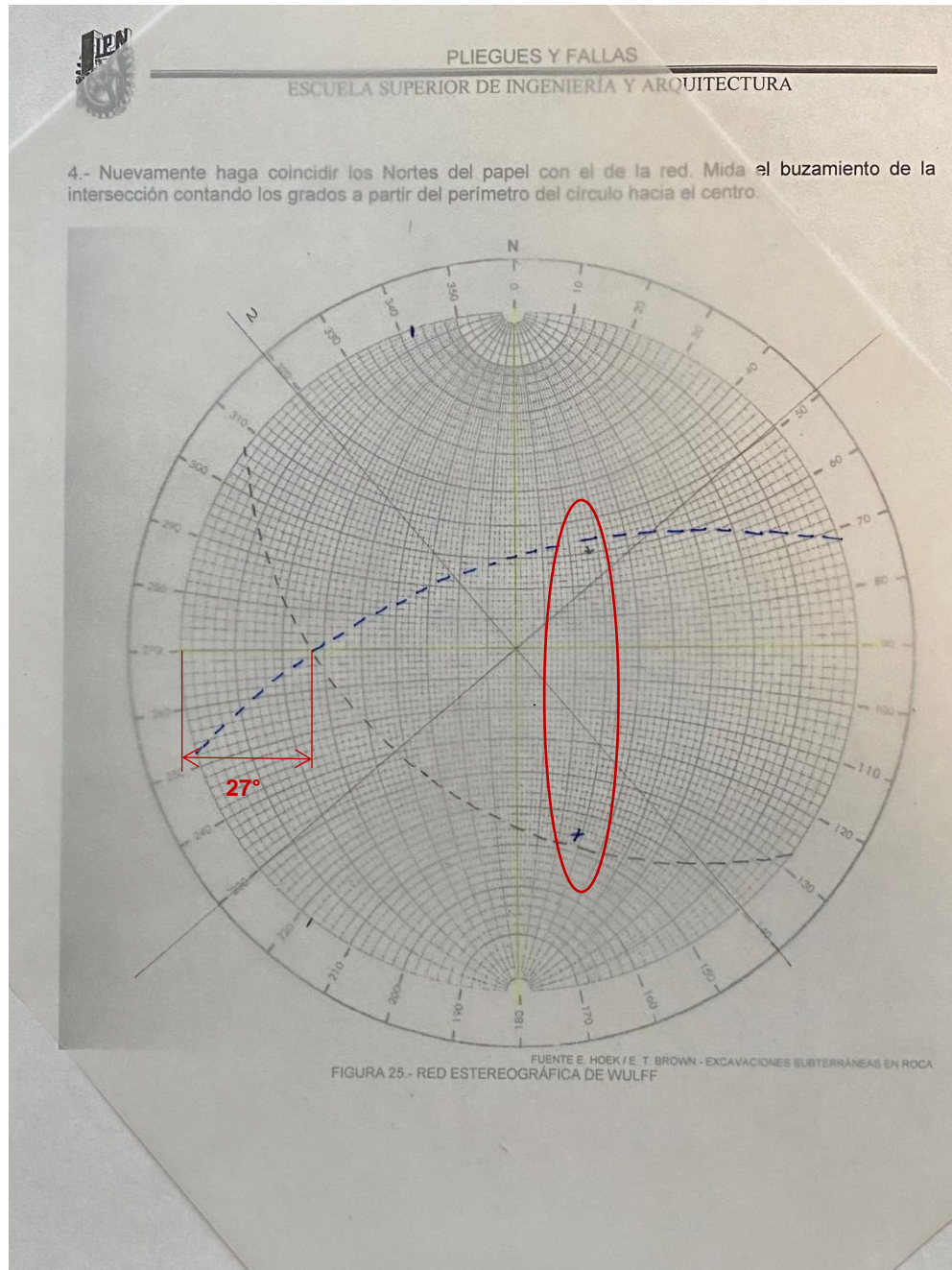


FIGURA 33.- HAGA COINCIDIR LA INTERSECCIÓN DE LOS DOS CÍRCULOS CON EL EJE ESTE – OESTE, MIDASE EL BUZAMIENTO DE LA LÍNEA DE INTERSECCIÓN CONTANDO LOS GRADOS A PARTIR DE LA CIRCUNFERENCIA DE LA RED, EN ESTE CASO 27°, NÓTESE QUE LOS POLOS DE AMBAS CAPAS SE UBICAN EN EL MISMO CÍRCULO.

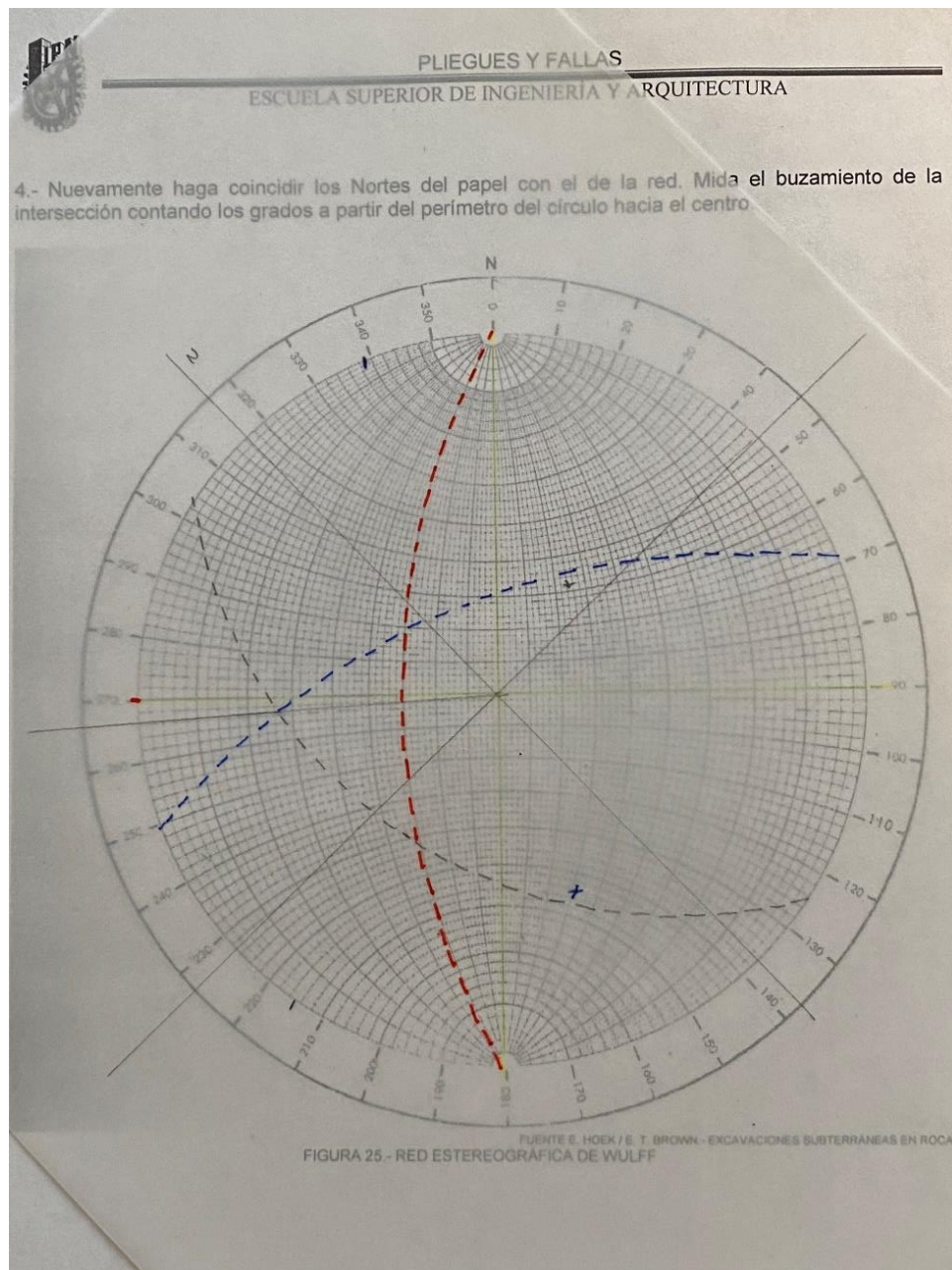


FIGURA 34.- DIBUJE EL GRAN CÍRCULO DEL TALUD.

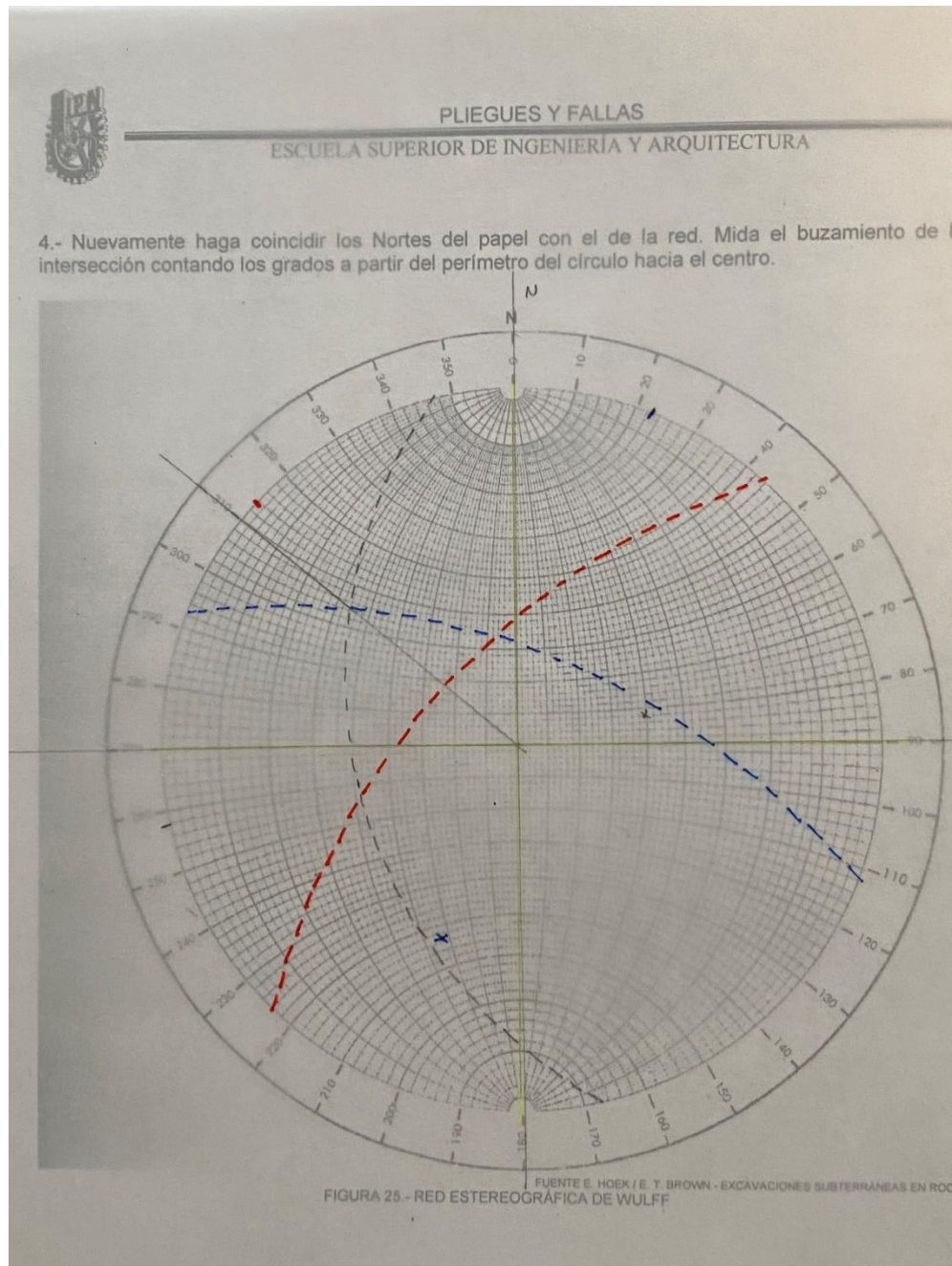


FIGURA 35.- FINALMENTE HAGA COINCIDIR LOS NORTES DE LA RED Y DEL PAPEL PARA OBTENER LA REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LAS CAPAS Y EL TALUD

La intersección de las dos capas, A y B, tendrá un azimut de 310° y un buzamiento de 27° .

Si, el ángulo del talud, β , es mayor al buzamiento de la línea de intersección, θ , pero θ es mayor al ángulo de fricción interna, es probable el deslizamiento.



BIBLIOGRAFÍA.

- HOEK, E. H. / BROWN, E. T.- Excavaciones Subterráneas en Roca
JUMIKIS, A. R.- Rock Mechanics
CASTRO FENÁNDEZ, M.- Apuntes de la clase de Geología, carrera de Ingeniera Civil, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional.
BRIONES GÁLVEZ, J. J.- Apuntes de la clase de Geología Aplicada, carrera de Ingeniera Civil, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional
RAGAN, D.M.- Geología Estructural
SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE ROCAS.- Simposio La Mecánica de Rocas en México
GARCÍA ROMERO, C.- Apuntes de la clase de Mecánica de Rocas, carrera de Ingeniera Civil, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional.
IMTA.- Geotecnia en Ingeniería de Presas