

acaba de exponer, se anotan a continuación las cantidades de puzolana que, según diversos autores, deben ser mezcladas con cada 100 kg de cemento Portland para formar los morteros y hormigones de las obras marítimas:

Foerster, 40 kg para el hormigón armado, en general, indicando que en las obras de puertos (refiriéndose a Alemania probablemente) se emplean de 60 a 80 kg, si bien Schülze, en su tratado *Seehafenbau*, y otros autores citan varias construcciones en que la proporción fué de 40 kg; Hambloch, tratadista alemán, aconseja como máximo 55 kg; Morsch, de 40 a 53 kg; Féret, 50 kg; Bénézit, de 43 a 57 kg; Luiggi, refiriéndose al hormigón armado, de 33 a 50 kg; Poulsen, 33 kg para la tierra de diatomeas cocida y 72 kg para el tras. Los autores alemanes se refieren todos al tras renano y Luiggi a las puzolanas de Roma y Bacoli.

En Holanda, donde se utiliza el tras, una proporción bastante empleada ha sido la de 40 kg; pero en las distintas obras ha variado entre 20 y menos, y 55 kg, llegándose, excepcionalmente, en un caso, a 100 kg. Algunas de dichas construcciones, hechas en 1909, se hallaban en buen estado en 1922. En los Estados Unidos se han adoptado recientemente, en un puerto para el hormigón armado, 38 y 55 kg de tras. En Italia se construyó, hace tres o cuatro años, un puente, también de hormigón armado, so-

metido a la influencia de las aguas marinas, en que la mayor proporción de puzolana fué de 38 kg.

Las cifras anteriores se han tomado de publicaciones diversas en que, salvo las francesas, italianas y dinamarquesas, figuran referidas al volumen, y como las densidades del Portland y puzolana en polvo, tal como éstos se emplean en las obras, son algo variables, no se puede garantizar que aquéllas, al ser traducidas en peso, resulten de una completa exactitud.

En los nuevos diques en construcción del puerto de Valencia, donde, a propuesta del ingeniero de Caminos Sr. Maese, se ha realizado la más importante aplicación hecha en España de morteros puzolánicos, el aglomerante está formado por cemento Portland y puzolana de la Península, de dos procedencias distintas, en la proporción de 50 kg en ambos casos. El hormigón para los cajones (que no tienen armaduras) está formado por 470 kg de aglomerante puzolánico, 0,4 m<sup>3</sup> de arena y 0,8 m<sup>3</sup> de piedra machacada, y el destinado a rellenar dichos cajones para constituir los bloques, por 211 kg de igual aglomerante, 0,445 m<sup>3</sup> de arena y 0,890 m<sup>3</sup> de piedra machacada. Las resistencias a la compresión a los veintiocho y noventa días han resultado para el primer hormigón, tal como se fabrica, iguales, respectivamente, a 365 y 461 kg por centímetro cuadrado, en el caso de una puzolana y a 234 y 344 kg, en el de la otra.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

## Estado actual de algunas cuestiones de Geofísica geológica

### I

La Geofísica, ciencia que estudia los fenómenos físicos de carácter general que ocurren en la Tierra, está progresando con gran rapidez. Sus investigaciones, principalmente las relativas a la gravedad, la isostasia, el volcanismo, la sismología, y el magnetismo y radioactividad de las rocas, arrojan resultados de mucho interés para la Geología y sus aplicaciones. Por ello no estará de más que, los que como los ingenieros, deben conocer varias de las aplicaciones de aquella ciencia, sigan los progresos de la Geofísica en las cuestiones con ella relacionadas.

Se ha terminado recientemente la obra alemana *Lehrbuch der Geophysik*, editada por el Dr. B. Gutenberg, de la Universidad de Francfort, en cuya confección se ha encargado cada materia a un especialista eminente. También se ha publicado, en el año 1926, otro interesante libro, aun cuando simplemente de vulgarización, titulado *Our mobile Earth*, por el profesor norteamericano R. A. Daly, de la Universidad de Harvard. Ambos libros han servido principalmente de base para la preparación de estas notas que, tratando de cuestiones de las que se ha ocupado en otras ocasiones la REVISTA <sup>1</sup>, se contraen a la formación y permanencia de continentes

y mares y a los movimientos lentos de la corteza terrestre, los cuales determinan, tanto los epirogénicos, o sea de grandes macizos continentales, como los orogénicos, que dan lugar a las grandes cordilleras que existen o han existido en nuestro planeta.

Como antecedentes a los referidos temas es preciso decir algo respecto al origen de la Tierra y a la constitución de sus partes superficial e interna, para lo que prescindiremos de ciertos detalles muy conocidos.

### Origen y desenvolvimiento de la Tierra

La hipótesis más admitida hasta el presente siglo era la propuesta primero por Kant, desarrollada después por Laplace y modificada luego por varios astrónomos, según la cual la Tierra formaba parte de una nebulosa en estado gaseoso, dentro de la que se formó todo el sistema solar. Se supone que, al contraerse la nebulosa, por el enfriamiento de su materia rodeada por los fríos espacios interestelares, se achataría según la dirección del eje de rotación, que poseía desde un principio, y, al dilatarse por ello su ecuador, se desprenderían masas anulares nebulosas que dieron lugar a la formación de los planetas, quedando el Sol como cuerpo central.

La referida hipótesis ha sido sustituida, por la mayoría de los actuales astrónomos y geólogos, por la propuesta por el norteamericano Chamberlin, que ha

<sup>1</sup> Año 1925, páginas 523 y 556, y año 1927, pág. 1.

sido completada y modificada posteriormente. En ella se admite, como en la de Laplace, que la Tierra y los demás planetas proceden del cuerpo que forma el Sol, pero que aquéllos se separaron de éste, no por el desprendimiento de masas anulares, sino en virtud de gigantescas mareas en el primitivo cuerpo celeste.

Dada la inmensidad del espacio, se concibe que las estrellas que en él se mueven rara vez se aproximarán suficientemente para ejercer apreciables acciones recíprocas. Pero Chamberlin supone que esto debió ocurrir con alguna enorme estrella que, pasando a algunos millares de kilómetros del primitivo Sol, determinó en su masa unas gigantescas protuberancias, semejantes a las muy pequeñas del conocido fenómeno de las mareas. El físico inglés Jeans estudió matemáticamente el problema y dedujo que la materia que escapase de la protuberancia solar, la cual, a medida que la estrella ocupa las posiciones  $E_1, E_2, E_3 \dots$ , va situándose enfrente en 1, 2, 3 ..., iría formando el filamento  $f_1, f_2, f_3 \dots$ , que, al alejarse la estrella que lo produjo, tomaría, bajo la atracción del Sol, un movimiento alrededor de éste, y más adelante se fraccionaría en masas que constituyeron la Tierra y los demás planetas.

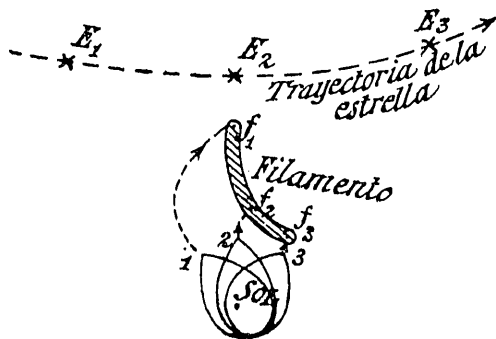


Fig. 1. Filamento solar, origen del sistema planetario. (Según Jeans.)

Posteriormente, otro geofísico inglés, Jeffreys, ha modificado en detalles las conclusiones de Jeans, y admite, como resultado de sus cálculos e investigaciones, que la Tierra, una vez formada, permanecería gaseosa durante algunos miles de años, hasta que, por las pérdidas por radiación, pasase al estado líquido, en el que se conservaría también otros miles de años, después de los cuales, continuando la rápida radiación, debió determinarse la formación de la corteza sólida.

La elevada temperatura de ésta imposibilitaría que el vapor acuoso pasase al estado líquido, es decir, a constituir los océanos, durante un largo período, que se llama anhidrico. Después el descenso de la temperatura permitiría la licuación del vapor de agua y, por consiguiente, los primitivos océanos; pero la temperatura sería aún inadecuada para que existiesen seres vivos, por lo que estos tiempos se denominan azoicos. Acaso estas primeras aguas recubrirían toda la corteza terrestre; pero como, dado el modo probable de formarse ésta, de lo que se tratará después, su superficie comenzaría pronto a presentar irregularidades, las profundidades oceánicas no serían las mismas en todas partes.

### Constitución de la litosfera y del interior de la Tierra

Por el estudio de las rocas que se encuentran en la superficie o a muy escasa profundidad, ha podido

conocerse la naturaleza de las rocas ígneas de la corteza o litosfera, algunas de ellas formadas en profundidades que alcanzan 16 km. Según los petrólogos norteamericanos Clarke y Washington, aun cuando en la superficie de la Tierra las rocas ígneas sólo ocupan la cuarta parte, correspondiendo la restante a las sedimentarias, la corteza está formada casi por completo por aquéllas, pues las sedimentarias que, donde se hallan, las recubren con espesores relativamente muy pequeños, a lo sumo de algunos kilómetros, creen aquellos petrólogos que sólo deben entrar en la proporción del 5 por 100, correspondiendo el 4 por 100 a las rocas arcillosas, el 0,75 por 100 a las arenosas y el 0,25 por 100 a las calizas.

Los geólogos alemanes clasifican las magmas de que proceden las rocas ígneas o eruptivas en dos tipos: el atlántico y el pacífico. El primero contiene, tanto en sus rocas ácidas como en las básicas, feldespatos alcalinos, y en el tipo pacífico éstos sólo son alcalinos en las rocas ácidas, mientras que en las básicas predominan los sódicocálcicos. Como tipo intermedio figura el magma basáltico de la región circumpolar nórdica, que llaman tipo ártico. En los tiempos paleozoicos dominan los magmas del tipo pacífico, que luego pierden importancia, quedando reclusos, durante la era terciaria, en los geosinclinales mediterráneos y de la zona circumpacífica, en cuyas regiones se hallan las grandes cordilleras actuales, constituidas por inmensas masas de rocas plegadas. En la figura 6.<sup>a</sup>, que aparecerá en un artículo, continuación de éste, se representan dichas cordilleras.

Los petrólogos ya citados, Clarke y Washington, publicaron, en 1924, los resultados de sus análisis de 5159 rocas eruptivas, procedentes de todas las regiones del Globo, entre las que se incluyen algunas submarinas. Con estos datos ha formado Washington unos interesantes cuadros, de los que se deducen, entre otros resultados, los siguientes:

1.º Las cuencas oceánicas están asentadas sobre rocas más básicas y más densas que las que corresponden a los continentes, siendo la densidad media en las que forman éstos, 2,75; en las del Atlántico, 2,85, y en las del Pacífico, 3,05. La circunstancia de que estas densidades sean mayores en los océanos que en los continentes, constituye un valioso apoyo de la moderna teoría de la isostasia, de que ya se ha tratado en esta REVISTA <sup>1</sup>.

2.º También resulta de aquellos cuadros que la densidad media de las rocas hipogénicas de cada macizo continental es menor cuanto mayor es su altitud media, habiéndose deducido que una diferencia de 600 m entre las altitudes medias de dos macizos afecta al segundo decimal en las cifras que dan las densidades, circunstancia que también apoya los principios de la isostasia.

La radioactividad de las rocas de la litosfera se estudia hoy día con interés, y se deducen varias consecuencias de carácter práctico, como, por ejemplo, las relacionadas con la repartición de las temperaturas en los macizos de los grandes túneles, según hizo ver Joly en su estudio sobre el Gotardo. Sabemos que la radioactividad de las rocas depende de su contenido en uranio y torio, cuyos átomos pueden alterarse y pasar a formar otros cuerpos de los antes reputados como simples. Se ha calculado,

<sup>1</sup> Año 1927, pág. 1.

por Rutherford, que la producción de calor de las rocas que contienen uranio puede evaluarse en  $5,6 \times 10^{-2}$  calorías por segundo y por gramo de uranio, y también que este metal se reduce a la mitad de su masa en  $5\,000 \times 10^6$  años, formándose sucesivos nuevos productos que terminan en el *PbU*, plomo de uranio, que ya no es radioactivo y constituye el producto estable en que termina la serie.

Los minerales, como pechblenda, autunita, uranita, que contienen uranio, han servido para dar una idea de la antigüedad de la Tierra y de los tiempos geológicos. Uno de los procedimientos consiste en determinar la cantidad de *PbU* que contienen los ejemplares, admitiendo que al formarse la roca carecía de dicha sustancia. Basándose principalmente en datos de esta naturaleza, dedujo el geólogo norteamericano Barrell, para la duración de los tiempos geológicos, las siguientes cifras, cuyo orden de magnitud creen Daly y otros que pueden admitirse:

Éra cenozoica . . . . .	55 millones de años
» mesozoica . . . . .	135 » »
» paleozoica . . . . .	360 » »
» pre-paleozoica . . . .	1 200 » »
» pre-geológica . . . .	? » »

Según se ha dicho anteriormente, sólo han podido estudiarse las rocas de la litoesfera formadas en profundidades hasta de unos 16 km, es decir, en una zona muy superficial de la corteza. El estudio de su constitución a mayores profundidades sólo puede conjeturarse por procedimientos geofísicos y geológicos. Valiéndose de los resultados de observaciones gravimétricas y por otros medios, ha llegado a deducirse que

la densidad media de todos los materiales constitutivos de la Tierra es de 5,52, y como la de los que se encuentran en los referidos 16 km es de 2,79, debe ser mayor la densidad de los que se hallan a más grandes profundidades. Los astrónomos y geólogos creen que los meteoritos son fragmentos de cuerpos cósmicos de composición semejante a la del interior de nuestro planeta, y, basándose en esta y otras consideraciones, creen que su núcleo estará constituido, como la mayoría de aquéllos, principalmente por hierro con níquel, y que su densidad debe ser de cerca de 8.

Partiendo de una corteza silicatada y un núcleo de hierro con níquel, ha llegado Goldschmidt a proponer una composición bastante aceptable para el interior de la Tierra. Se basa en la hipótesis, hoy más admitida, de que la Tierra tuvo una fase líquida en la que estaría formada por un magma que, en virtud de progresivo enfriamiento, se diferenciaría, quedando dividido por superficies sensiblemente hidrostáticas en orden de densidades crecientes hacia el centro. De los datos reunidos respecto a las rocas que componen la parte de la corteza que no es accesible, y aprovechando los resultados de varias investigaciones geofísicas, principalmente las sismométricas, que acusan diferencias de elasticidad en las capas a diversas profundidades, especialmente a 120, 1 200 y 2 900 km, y también las gravimétricas, en virtud de las cuales hace Goldschmidt coincidir la superficie de nivel isostático con la situada a 120 km, lo que se considera una profundidad excesiva para aquel nivel por varios geodestas, dedujo dicho geofísico la composición que se consigna en el siguiente cuadro, en el que también figuran interesantes datos tomados de los trabajos de Suess, Daly y Van Hise.

Composición de la Tierra desde la superficie al centro

Envolventes principales	Composición según Suess	Según Goldschmidt			Según Daly			Zonas de Van Hise	
		Composición	Profundidades — Km.	Densidades	Composición	Profundidades — Km.	Densidades	Según la rigidez de las rocas	Según la alteración de las rocas
ATMÓSFERA. HIDROESFERA									
LITOSFERA O ENVOLVENTE SILICATADA	Sial	Corteza silicatada	120	2,8	Corteza	60	2,9	Zona de fractura	Zona de disgregación. Zona de cementación
		Superficie de nivel isostático					2,85	Zona de fluidez	Zona de metamorfismo regional
BARIOSFERA	Níquel (núcleo de hierro con níquel)	Sima	Capas de eclogita	1 200	3,0 a 4	Silicatada	1 000	a 4,5	
			Capas sulfatadas y oxidadas	2 900	5 a 6	Silicatos y hierro	2 880	4,5 a 9	
		Núcleo metálico		Cerca de 8	Hierro con níquel		9 a 11,0		

La división que Suess propuso para la litoesfera en las dos partes, superior o *sial* e inferior o *sima*, se ha relacionado en el cuadro con las divisiones de Goldschmidt. Recordaremos que el sial es la parte superior de la litoesfera formada por rocas ligeras caracterizadas por silicio y aluminio, del tipo del granito y gneis, y con densidad media de 2,7, y el sima la zona pétreo debajo del sial, cuyos compo-

nentes principales son el silicio y el magnesio, tipo los basaltos, con densidad de 3 ó algo más. Se explica esta separación entre la corteza silicatada ácida y la parte inferior más básica, admitiendo que en el primitivo magma líquido, de un modo análogo a lo que la Petrografía ha revelado respecto a los magmas de que proceden las rocas hipogénicas, se formarían primero cristales de minerales ferromagnesianos, los

cuales se hundirían por su mayor densidad, quedando, por consiguiente, encima un magma más ácido que el primitivo y debajo aquellos cristales que irían formando el sima; hoy día se asimila el sima a la eclogita más bien que al basalto, y se le asigna una densidad de 3,5 a 4. La separación entre el sial y el sima, que se supone coincide con el nivel isostático, no será una superficie de nivel esférico, sino que presentará irregularidades. Wegener ha llamado la atención sobre el hecho de que, como tanto en los continentes como en los mares, las observaciones gravimétricas dan valores que se separan poco del normal, a pesar de que los mares constituyen cuencas en que falta materia, y los continentes y grandes montañas regiones en las que aquélla está en exceso, habrá que admitir mayor densidad que la normal en las capas submarinas y menor en las que forman los continentes y montañas, lo que, por otra parte, está de acuerdo con los resultados de los trabajos de Washington citados anteriormente. Aun cuando Wegener, por lo que acaba de exponerse y otras consideraciones, cree que bajo los océanos, y recubierto por una capa de cienos, debe estar el sima, está más admitida la idea de que el sial se encuentra en todas partes, aunque bajo los mares tendrá menos espesor que en los continentes.

A este efecto se mencionarán algunas ideas emitidas por Daly en apoyo de su teoría para explicar la formación de las montañas. En los continentes dominan los granitos y el gneis, algunas veces en la superficie y más generalmente debajo de las capas sedimentarias, pero en las islas volcánicas predomina el basalto, y se cree que en los fondos oceánicos, a pesar de que no han podido recogerse muchos fragmentos de sus rocas, recubiertas de cienos y a grandes profundidades, deben escasear mucho o no existir las rocas del sial del tipo ácido, como lo comprueban los ejemplares estudiados por Washington. Apoya también estas ideas la consideración siguiente: Si las rocas submarinas fuesen de la misma naturaleza que las continentales tendrían la misma densidad que éstas, y como aquéllas sobresalen respecto a las cuencas oceánicas, su exceso de masa atraería a las aguas que, por consiguiente, perderían su superficie esférica; pero las observaciones geodésicas y otras comprueban que no sufren aquéllas la marcada alteración en su forma superficial, que resultaría a igualdad de densidades, por lo que parece que debe admitirse que se establece una cierta compensación entre las atracciones del continente y del fondo marino, en virtud de la mayor la densidad de las rocas bajo los mares. Así se expresa en la sección diagramática representada, en la que, además, se atribuye a la

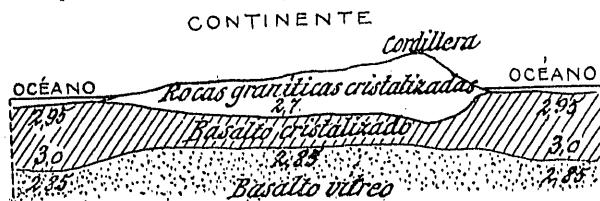


Fig. 2. Sección diagramática mostrando la composición y la distribución de densidades en la corteza terrestre. (Según Daly.)

región de la cordillera un espesor total de rocas graníticas cristalizadas superior a las que se suponen en el resto del continente. Se admite para ello la teoría de la isostasia, partiendo de la hipótesis de

Pratt <sup>1</sup>, y, según especifica el cuadro anterior, Daly supone que, a una profundidad media de unos 60 km, se encuentra el basalto vítreo, sobre el cual el peso de una columna formada por el agua del mar y todo el espesor de rocas subyacentes hasta llegar a dicho basalto equilibra otra columna de igual base y hasta llegar al mismo basalto, formada por las rocas bajo los continentes y montañas. Aclara estas ideas el examen de la sección diagramática, en la que las cifras significan densidades, pues se concibe que los continentes están como flotando al modo como los «icebergs» lo hacen sobre los mares.

Siguiendo con las ideas de Daly, dice éste que se comprende en gran parte la isostasia admitiendo que la roca suboceánica sea, en su casi totalidad, el basalto cristalizado, cuya densidad de 2,9 a 3 es de 7 a 10 por 100 mayor que la del granito que constituye los continentes. Admite, fundándose, entre otras cosas, en el estudio de las lavas y fenómenos volcánicos, que por bajo de la profundidad media de unos 60 km, el basalto no debe estar ya cristalizado, sino que se encontrará en estado vítreo, por hallarse a una temperatura demasiado alta para cristalizar, y lo supone con viscosidad suficiente para poder subir a la superficie en erupciones, allá donde estén fracturadas las capas superiores de material cristalizado. Asigna a este basalto, en su parte superior, la densidad de 2,85, menor que la del cristalizado, pues es sabido que los poros se reducen cuando pasan al estado cristalino los cuerpos; la referida densidad irá aumentando con la profundidad. En la sección diagramática se ha representado el basalto cristalizado con menor espesor bajo el macizo continental, y esto obedece a que, siendo las rocas graníticas más radioactivas que las basálticas, conservan más el calor y, por consiguiente, el basalto que se halle bajo aquéllas se enfriará menos que el situado bajo los océanos y pasará más lentamente de vítreo a cristalizado.

La manera de transmitirse las ondas sísmicas, así como otros varios fenómenos, excluyen la posibilidad de que exista una masa líquida constituyendo el interior de la Tierra. Sin embargo, la flotación de los continentes supone cierta fluidez en el magma sustentador. Ambas cosas son posibles, es decir, que el interior de la Tierra tenga los caracteres de rigidez y fluidez, si se considera que un cuerpo que, durante un corto período de tiempo, aparece como rígido, puede, durante un período largo, comportarse como viscoso y aun flúido. La Tierra, en su parte interna, bajo la acción de las fuerzas de corta actuación, como las que producen los terremotos, debe considerarse como un cuerpo rígido, mientras que se comporta como viscosa y hasta flúida cuando se trata de los movimientos epirogénicos, de la formación de las cordilleras plegadas y de otros que requieren que las fuerzas actúen durante millones de años. Por consiguiente, puede admitirse que el sial y el sima constituyen un sistema hidrostático en el que aquél es un cuerpo flotante en el sima, cuando se abarcan los inmensos períodos de tiempo geológicos, para los cuales el sima puede considerarse como flúido, por lo que lo llamaremos *geológicamente flúido* en todo lo que sigue.

N. PUIG DE LA BELLACASA  
Profesor de la Escuela de C., C. y P.

<sup>1</sup> REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1927, pág. 1.