

Trabajo Final

El impacto de la saturación parcial de agua en la resistencia de las rocas: Un estudio experimental en areniscas.

Manuela Morales Demarco

Tutor: Dr. Pedro Oyhantçabal⁽¹⁾

Co-Tutor: Dr. Siegfried Siegesmund⁽²⁾

**Licenciatura en Geología
Departamento de Geología**

Tribunal:

Dr. Claudio Gaucher

Msc. Juan Ledesma

Ing. Agr. Jorge Spoturno

**Facultad de Ciencias
Universidad de la República
Montevideo
Uruguay⁽¹⁾**

**Struktur und Geodynamik Lab
Georg-August-Universität
Göttingen
Alemania⁽²⁾**

Marzo 2007

Tabla de contenidos:

	Pág.
1. Resumen	3
2. Introducción	4
3. Objetivos	5
4. Materiales estudiados: Marco Geológico y Descripción	6
4.1. Clasificación de Areniscas	6
4.2. Localización Geográfica y posición Estratigráfica	8
4.3. Descripción Macroscópica	8
5. Caracterización mineralógica y microestructural	17
5.1. Cátodoluminiscencia	17
5.2. Difracción de Rayos X	18
5.3. Descripción Microscópica	19
6. Propiedades Petrofísicas	42
6.1. Densidad	42
6.2. Porosidad y distribución de tamaños de poros	43
6.3. Permeabilidad	47
6.4. Expansión Higroscópica	48
6.5. Ensayos Mecánicos	49
a. Resistencia a la Tensión Indirecta (Ensayo Brasil)	51
b. Resistencia a la Compresión Uniaxial (Ensayo UCS)	52
7. Discusión de las relaciones entre las propiedades petrofísicas	54
7.1. Densidad y Porosidad	54
7.2. Porosidad y Permeabilidad	55
7.3. Porosidad y Resistencia	58
7.4. Densidad y Resistencia	62
7.5. Contenido de agua y Resistencia	64
7.6. Ensayos Brasil y UCS	69
7.7. Dimensión de muestra y resistencia	69
8. Conclusiones	70
Referencias	74
Agradecimientos	76

1. Resumen

El conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas es de fundamental importancia en la industria extractiva de hidrocarburos, así como también en obras de ingeniería civil y arquitectura. El contenido de agua es uno de los factores que más influyen en la resistencia de las rocas, siendo necesario conocer de antemano esta influencia.

El principal objetivo de la presente investigación es conocer la sensibilidad al contenido de agua en la resistencia de las areniscas estudiadas, utilizando para ello especímenes con distinto porcentaje de saturación en agua (100%, 50%, 20%, 10%, 5% y 0%). Como objetivos específicos se busca determinar distintas propiedades petrofísicas de estas areniscas, caracterizarlas petrográficamente y mineralógicamente y, finalmente, correlacionar sus propiedades (petrofísicas, mineralógicas y petrográficas) con sus comportamientos mecánicos.

Los estudios petrofísicos que se realizan buscan determinar la densidad, porosidad, distribución de tamaño de poros, permeabilidad, expansión higroscópica, resistencia a la compresión uniaxial (a través del Ensayo UCS, por sus siglas en inglés) y resistencia a la tensión indirecta (Ensayo Brasil) de las areniscas estudiadas. Tanto la permeabilidad como la expansión higroscópica y los ensayos mecánicos se efectúan en dos direcciones, una paralela a la estratificación y otra perpendicular a esta. La caracterización petrográfica y mineralógica se realiza a través de estudios petrográficos (análisis de microscopio y cátodoluminiscencia) y difracción de rayos X. La correlación entre las distintas propiedades analizadas se efectúa a través de análisis estadísticos de los resultados obtenidos.

Los valores obtenidos de las diferentes propiedades analizadas, para todas las areniscas consideradas, se mencionan a continuación. La densidad varía entre 2,01 y 2,49 g/cm³, la porosidad entre 6,04 y 23,81%, la permeabilidad entre 0,02 y 2951 mD, la expansión higroscópica entre 0,00215 y 0,0944 mm, en especímenes secos la resistencia a la compresión uniaxial varía entre 50,2 y 204,6 MPa y a la tensión indirecta entre 2,51 y 4,32 MPa.

Las areniscas se agrupan en función de su comportamiento en los distintos ensayos realizados. Así, las areniscas más porosas son arenitas cuarzosas pobremente cementadas que presentan la menor densidad, la mayor permeabilidad, la menor resistencia mecánica y la menor sensibilidad de la resistencia al contenido de agua. Las areniscas menos porosas son las más densas, presentan la menor permeabilidad y la mayor resistencia mecánica, son de distintos tipos petrográficos (arenita cuarzosa, subarcosa) pero siempre están fuertemente cementadas y la sensibilidad de su resistencia al contenido de agua es variable, estando en los valores medios registrados en esta investigación. Las areniscas cuya resistencia es más sensible al contenido de agua son sublitarenitas, cuyos valores de porosidad, densidad y permeabilidad son medios. Así, la sensibilidad de la resistencia de una roca al contenido de agua es principalmente función de su mineralogía y su grado de cementación.

2. Introducción

La presente investigación es el Trabajo Final de la Licenciatura en Geología (Facultad de Ciencias, Universidad de la República), que fue desarrollada en Alemania, en los laboratorios del Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns y del Departamento de Geología Estructural y Geodinámica de la Universidad de Göttingen (Georg-August Univeristät Göttingen).

El conocimiento de la variabilidad de la resistencia de las rocas bajo diferentes contenidos de humedad es de gran aplicación en la industria extractiva de petróleo, como ha sido señalado por Han et al. (2002); Han et al. (2004); Acock et al. (2004). En el desarrollo de un pozo de petróleo, el agua formacional o el agua que se introduce para aumentar la producción, puede ser uno de los factores que produce debilitamiento de la roca caja, que generalmente es inconsolidada o débilmente consolidada (Han et al., 2004).

Para predecir el comportamiento de una roca alrededor de un pozo extractivo y para controlar su "arenamiento" (como ha sido definido por Acock et al., 2004), es importante conocer de antemano la resistencia de la roca (Han et al., 2004). El "arenamiento" de un pozo es la producción de grandes cantidades de arena durante su explotación como consecuencia de fracturas a escala de grano, con el riesgo, entre otros, del colapso del pozo, inseguridad para el personal y deterioro del medio ambiente, todo esto significa una gran pérdida para esta industria.

En los últimos años algunas investigaciones han sido realizadas para determinar la "sensibilidad" de la resistencia de areniscas y distintas rocas, fundamentalmente sedimentarias, al contenido de agua, para especímenes completamente secos y saturados en agua (Dyke y Dobereiner, 1991; Hawkins y McConnell, 1992). Estos estudios han probado que la resistencia, en general, decrece con el aumento de humedad, incluso para pequeñas cantidades de agua. No obstante, la influencia de la saturación parcial de agua en la resistencia de las rocas aún no se entiende completamente.

Esta investigación estudia la sensibilidad de la resistencia de ocho areniscas al contenido de agua usando ensayos UCS (por su sigla en inglés, resistencia a la compresión uniaxial) y Brasil (resistencia a la tensión indirecta). La determinación de importantes parámetros petrofísicos, como densidad, porosidad, permeabilidad, y la caracterización petrográfica permite la correlación entre estas propiedades y el comportamiento mecánico observado.

3. Objetivos

Objetivos Generales:

- a. Determinación de la sensibilidad al contenido de agua en la resistencia de diferentes areniscas, usando especímenes con distinto porcentaje de saturación de agua (100, 50, 20, 10, 5 y 0%).

Objetivos Específicos:

- b. Determinación de propiedades petrofísicas: densidad, porosidad, distribución del tamaño de poros, permeabilidad, resistencia a la compresión uniaxial (ensayo UCS) y resistencia a la tensión indirecta (ensayo Brasil) de ocho areniscas de diferentes localidades de Alemania.
- c. Caracterización petrográfica y composición mineralógica de las areniscas analizadas en el objetivo b.
- d. Correlación de las propiedades petrofísicas, mineralógicas y petrográficas de las areniscas estudiadas con su comportamiento mecánico.

4. Materiales estudiados: Marco Geológico y Descripción

El material de muestra usado en esta investigación consiste en diferentes tipos de areniscas terrígenas o siliciclásticas que fueron colectadas de canteras en Alemania.

La selección de estas areniscas tuvo como objetivo tener una variedad de propiedades mineralógicas, petrográficas y petrofísicas que permitan la correlación con su comportamiento mecánico.

4.1. Clasificación de Areniscas

Las areniscas son una variedad de rocas sedimentarias que están caracterizadas por tener un tamaño de grano entre 2 mm y 62.5 micras.

La primera clasificación de las arenas es en terrígenas, carbonáticas y piroclásticas. Las arenas terrígenas son aquellas que derivan principalmente de la erosión de rocas preexistentes cristalinas, volcánicas y sedimentarias localizadas fuera de la cuenca de depositación (Pettijohn et al., 1987).

Millimeters (mm)	Micrometers (μm)	Phi (ϕ)	Wentworth size class	Rock type
4096		-12.0	Boulder	Conglomerate/ Breccia
256		-8.0	Cobble	
64		-6.0	Pebble	
4		-2.0	Granule	
2.00		-1.0		
			Very coarse sand	Sandstone
1.00		0.0	Coarse sand	
1/2	500	1.0	Medium sand	
1/4	250	2.0	Fine sand	
1/8	125	3.0	Very fine sand	
1/16	63	4.0	Coarse silt	Siltstone
1/32	31	5.0	Medium silt	
1/64	15.6	6.0	Fine silt	
1/128	7.8	7.0	Very fine silt	
1/256	3.9	8.0		Claystone
0.00006	0.06	14.0	Clay	

Figura 4.1: Clasificación de Udden-Wentworth según el tamaño de grano para sedimentos terrígenos (Wentworth, 1922).

Las ocho areniscas estudiadas en esta investigación son terrígenas o siliciclásticas y la clasificación usada en la descripción petrográfica está basada en las clases de tamaño de grano de Udden-Wentworth y el sistema de clasificación de arenas y areniscas terrígenas de Dott (1964).

Las areniscas están compuestas por un esqueleto (los granos minerales), una matriz (la fracción detrítica más fina, hasta 30 micras, según Dott, 1964), el cemento (producto de la precipitación química durante la diagénesis) y los poros (el espacio vacío de la roca).

El tamaño de grano es una de las propiedades texturales de las areniscas, junto a la forma, redondez, selección, características superficiales, fábrica de los componentes y el sistema de poros (Pettijohn et al., 1987).

El tamaño de grano en esta investigación es determinado por la medición directa del diámetro de los granos más grandes, en muestra de mano y en observación microscópica en lámina delgada. Para la nomenclatura del tamaño de grano de las areniscas son usadas las clases granulométricas de Udden-Wentworth (figura 4.1).

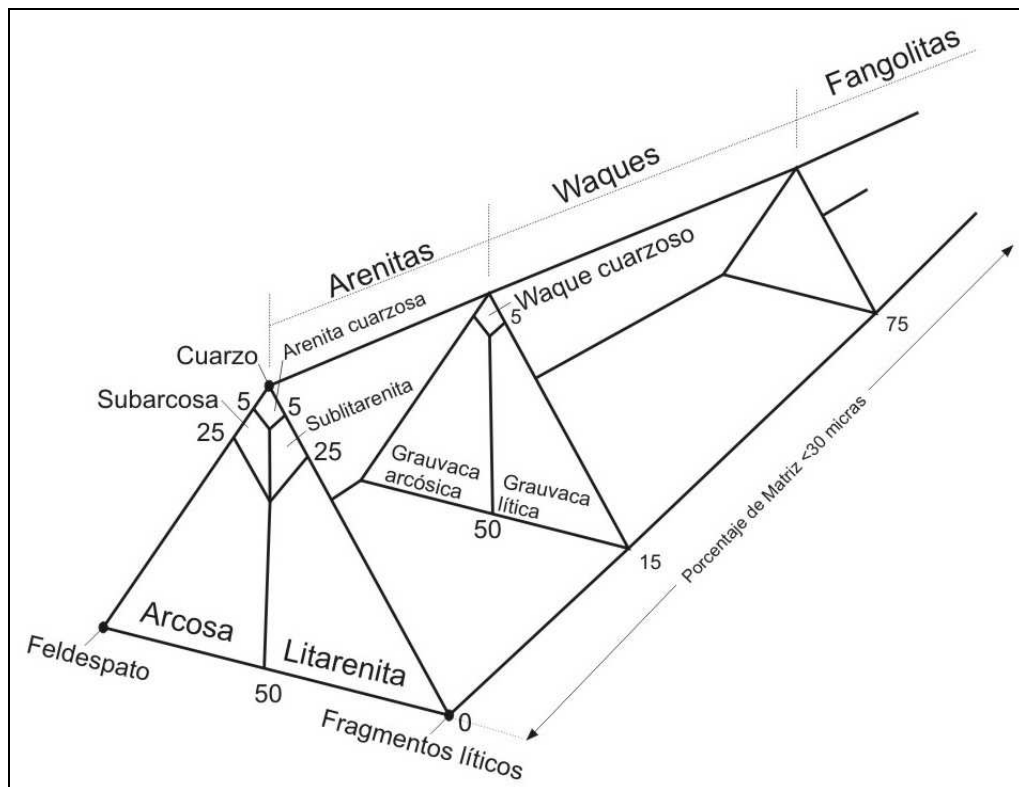


Figura 4.2: Clasificación de areniscas terrígenas, Modificado de Dott, 1964. (Modificado de Pettijohn et al., 1987).

La clasificación de Dott (1964) (ver figura 4.2) considera en primer lugar tres componentes principales del esqueleto: cuarzo, feldespato y fragmentos líticos. De acuerdo con la proporción de estos tres componentes las areniscas se dividen en arenitas cuarzosas, arcosas a subarcosas y arenitas líticas. En segundo lugar, se tiene en cuenta la proporción de matriz y divide las areniscas en arenitas, wackes y fangolitas, Pettijohn et al. (1987).

La forma, redondez y fábrica de los granos, junto a otras propiedades, son útiles para describir a las areniscas. La forma se describe por las relaciones de

los diámetros del grano (mayor, mediano y menor) y según Zingg (1935) hay cuatro tipos principales: esférico, laminar, discoidal (oblato) y prolado. Redondez es la curvatura de los bordes. Normalmente estos dos parámetros son estimados usando sets de imágenes estándar. La fábrica de las areniscas es la disposición geométrica de los granos que forman la roca: los contactos entre granos (puntuales, longitudinales, cóncavo-convexos y suturados) y sus orientaciones como lo describen Pettijohn et al. (1987).

4.2. Localización Geográfica y posición Estratigráfica

Las distintas areniscas fueron colectadas de ocho canteras en siete localidades de Alemania (ver figura 4.3 y tabla 4.1). Bloques de muestras frescas fueron elegidos para evitar efectos de meteorización e inhomogeneidades litológicas. Sus edades geológicas van desde el Pérmico al Triásico (ver figura 4.4 y tabla 4.1).

Nombre	Código	Localidad	Edad Geológica
Bad Bentheim	Ba	Bad Bentheim, Baja Sajonia	Cretácico inferior
Bebertal	Be	Magdeburg, Sajonia Anhalt	Rotliegend – Pérmico inferior
Obernkirchen	Ob	Obernkirchen, Baja Sajonia	Cretácico inferior
Sander	Sa	Sand, Baviera	Keuper medio-Triásico superior
Schleeriether	Sc	Schleerieth, Baviera	Keuper medio-Triásico superior
Tambach	Ta	Tambach-Dietharz, Thuringia	Rotliegend - Pérmico inferior
Weser grau	Wg	Bad Karlshafen, Hesse	Buntsandstein - Triásico inferior
Weser rot	Wr	Bad Karlshafen, Hesse	Buntsandstein - Triásico inferior

Tabla 4.1: Localidades de muestreo de las areniscas y sus edades geológicas.

La geología post-varíscica de Europa central, a la cual pertenecen todas las areniscas estudiadas, es muy compleja y excede los objetivos de esta investigación. Para una detallada descripción de la Geología de Alemania se remite al lector al trabajo de Henningsen y Katzung (1992).

Estas areniscas abarcan un amplio rango de tipos petrográficos: depósitos tipo molasa de la Formación Rotliegend que es post- varíscica (Bebertal y Tambach), depósitos terrestres desde fluviales a facies de playa/sabkha en Buntsandstein (Weser grau y Weser rot) y Keuper (Sander y Schleeriether) y también areniscas del Cretácico inferior que fueron depositadas en cuencas poco profundas cercanas a la costa como depósitos de tipo Barren (Bad Bentheim y Obernkirchen). Estas dos últimas areniscas son roca almacén de petróleo y Bebertal es portadora de gas.

4.3. Descripción Macroscópica

Para la descripción macroscópica de las areniscas algunas de las propiedades texturales han sido analizadas junto con el color y las estructuras sedimentarias.

a. Bad Bentheim:

Es una arenita cuarzosa de grano grueso de color blanco. El cemento es muy escaso y consiste en cemento silíceo y pátina de óxido de hierro (este es revelado en la observación macroscópica por puntos de color amarillo a anaranjado). La selección es buena a muy buena. Los granos son redondeados a subredondeados, esféricos a prolados y la textura es grano soportada. La estructura observada es una estratificación plano paralela. (Figura 4.5).

b. Bebertal:

Esta roca es una sublitarenita de grano muy grueso de color rosado. El cemento consiste principalmente en parches de calcita y sílice. La selección es pobre a moderada. Los granos son redondeados a subredondeados, las formas más frecuentes son la esférica y prolada, presenta una textura grano soportada. La estratificación es plano paralela. (Figura 4.6).

c. Obernkirchen:

Es una arenita cuarzosa de grano medio y color blanco a anaranjado. El cemento es escaso y está representado por sílice y pátinas de óxido de hierro. La selección es moderada a buena. Los granos son redondeados, esféricos y prolados, la textura es grano soportada. La estructura observada es una estratificación plano paralela poco desarrollada. (Figura 4.7).

d. Sander:

Esta arenisca es clasificada como una sublitarenita de grano medio, de color verde, con puntos amarillos que pueden corresponder a agregados de óxido de hierro o arcilla. El cemento es silíceo y también existen parches de óxido de hierro y calcita. La selección es moderada a buena. Los granos son subangulares y subredondeados, esféricos y prolados, la textura de la roca es grano soportada. La estructura observada es una estratificación plano paralela bien desarrollada. (Figura 4.8).

e. Schleeriether:

Es una sublitarenita de grano medio y color verde. El cemento es principalmente parches de calcita, con menor proporción de cemento silíceo y parches de óxido de hierro. La selección es moderada a pobre. Los granos son redondeados a subredondeados, la mayoría tienen forma prolada y esférica. La fábrica es grano soportada. La estratificación cruzada plano paralela está marcada por la acumulación de minerales opacos. (Figura 4.9).

f. Tambach:

Esta roca es una arenita cuarzosa de grano medio y color rojo. El cemento es muy abundante y consiste en parches de calcita, cemento síliceo y pátina de óxido de hierro. La selección es pobre a moderada. Los granos son subangulares a subredondeados, esféricos y prolados. La textura es grano soportada. La estratificación plano paralela es muy clara y se observa una gradación normal. (Figura 4.10).

g. Weser grau:

Es una arcosa a subarcosa de grano grueso y color gris. El cemento es principalmente sílice. La selección es buena. Los granos son redondeados, esféricos y prolados. La textura es grano soportada. Se observa una estratificación cruzada plano paralela. (Figura 4.11).

h. Weser rot:

Esta roca es una subarcosa de grano medio y de color rojo. El cemento está representado por sílice y parches de calcita y óxido de hierro. La selección es buena. Los granos son subredondeados a redondeados, esféricos y prolados. La textura de la roca es grano soportada. La estratificación plano paralela es marcada. (Figura 4.12).

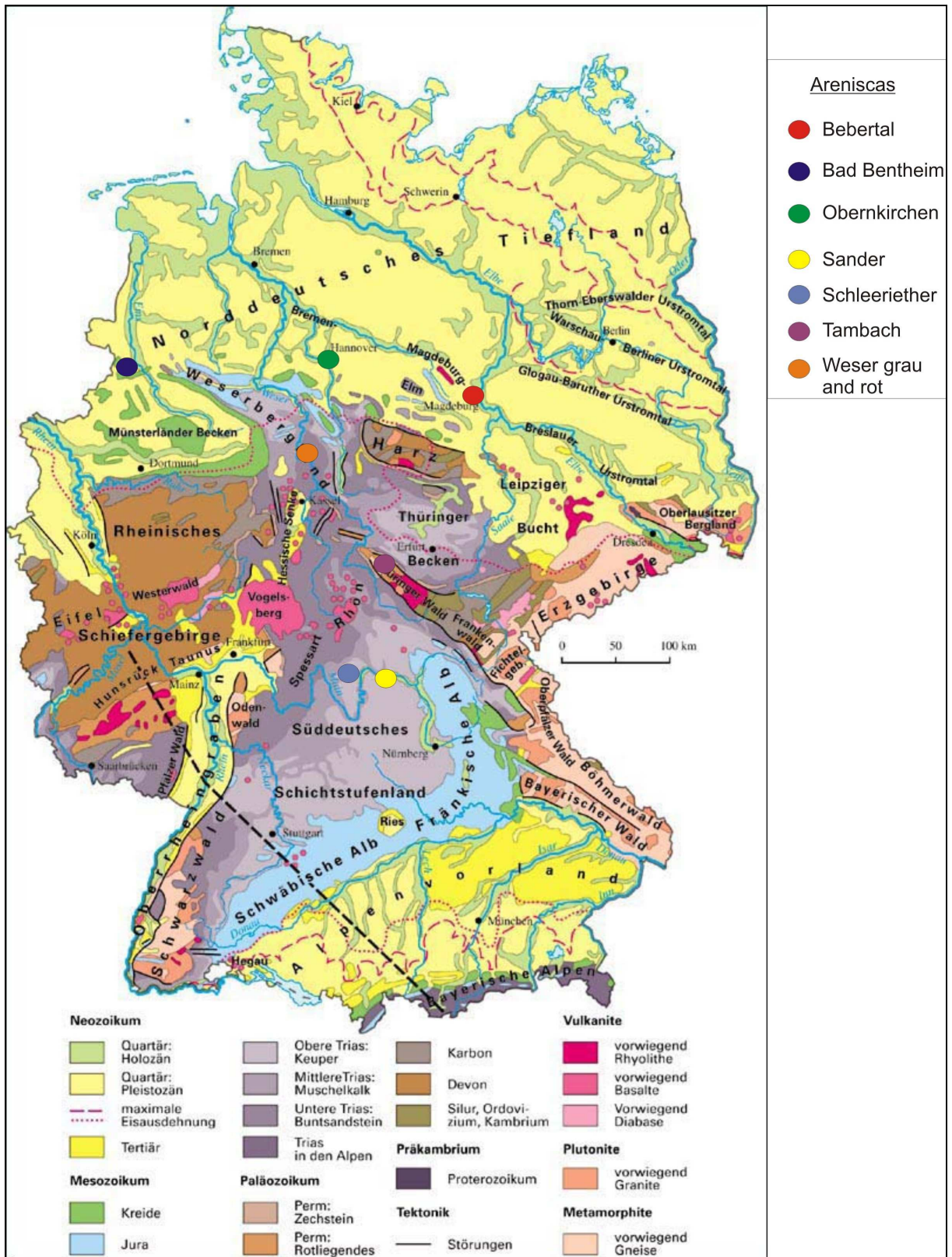


Figura 4.3: Mapa Geológico de Alemania con la localización de los puntos de muestreo.
(Fuente: www.mr-kartographie.de/g-geolog-dt.htm)

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

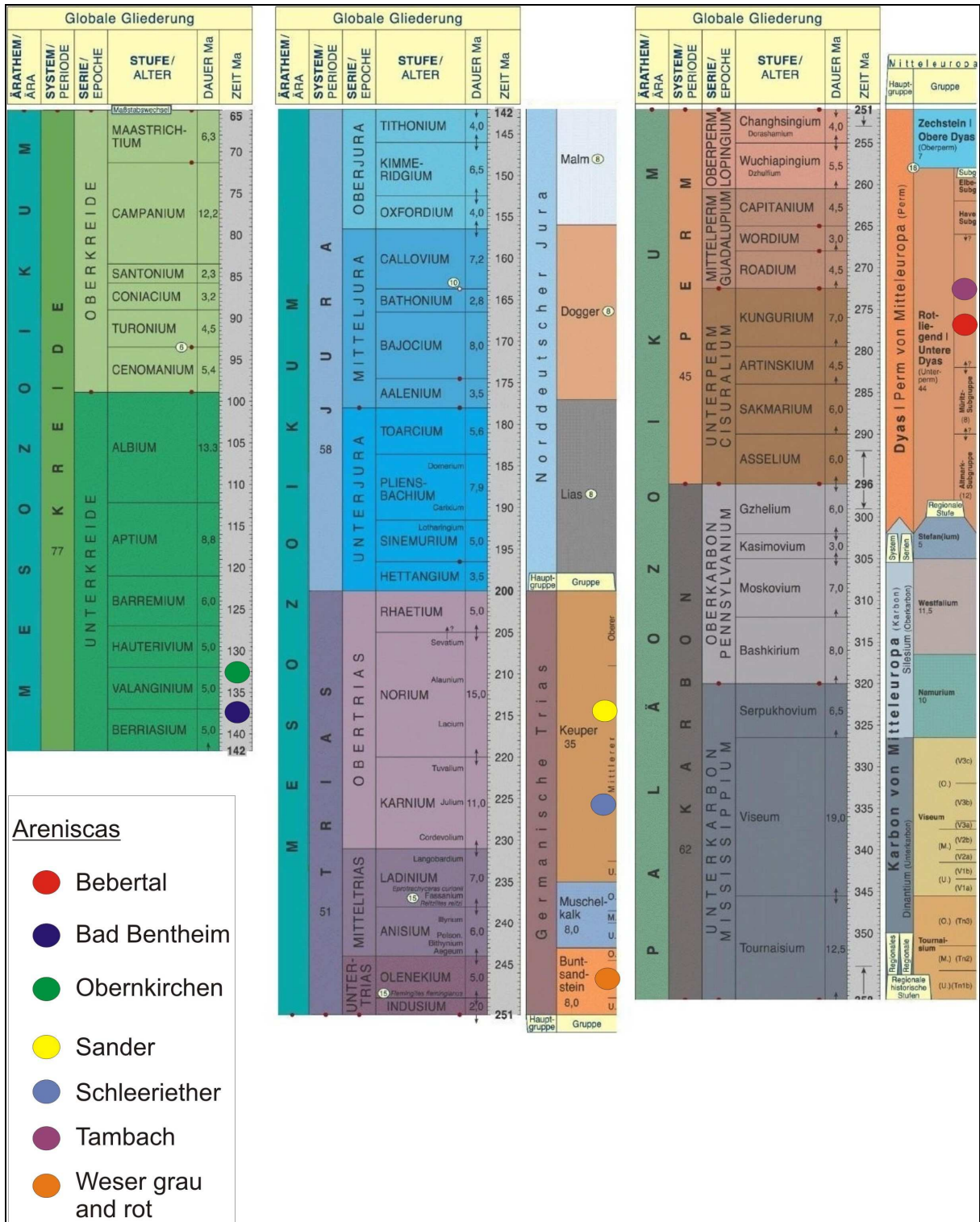


Figura 4.4: Tabla estratigráfica de Alemania con las edades de las areniscas. (Modificada de la Tabla Estratigráfica de Alemania, Deutsche Stratigraphische Kommission).

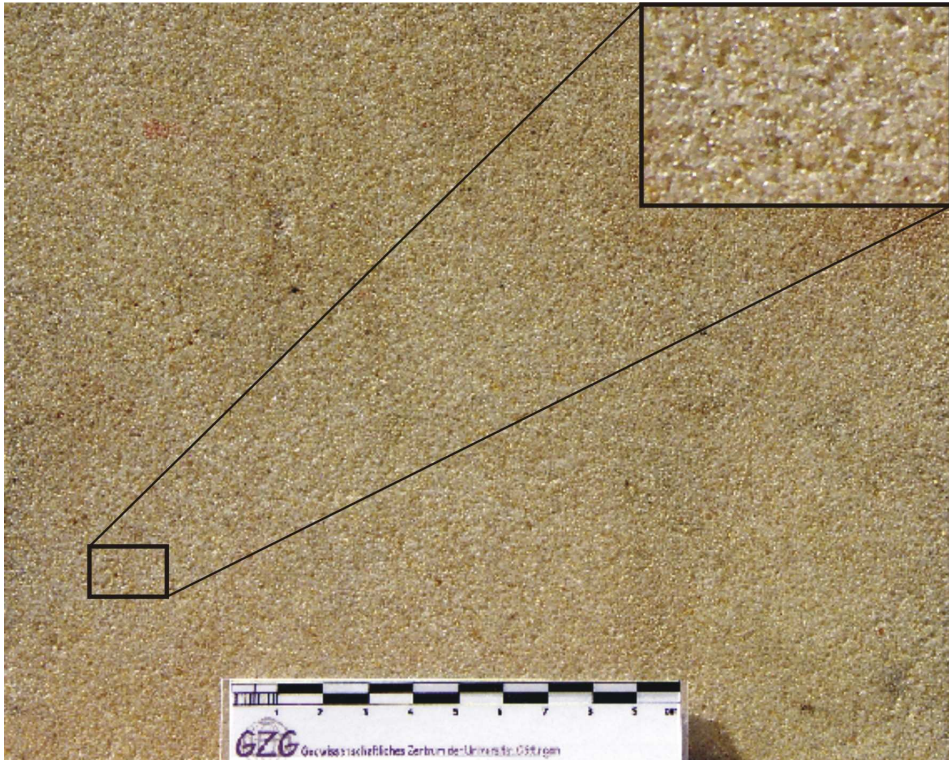


Figura 4.5: Bad Bentheim, vista paralela a la estratificación.

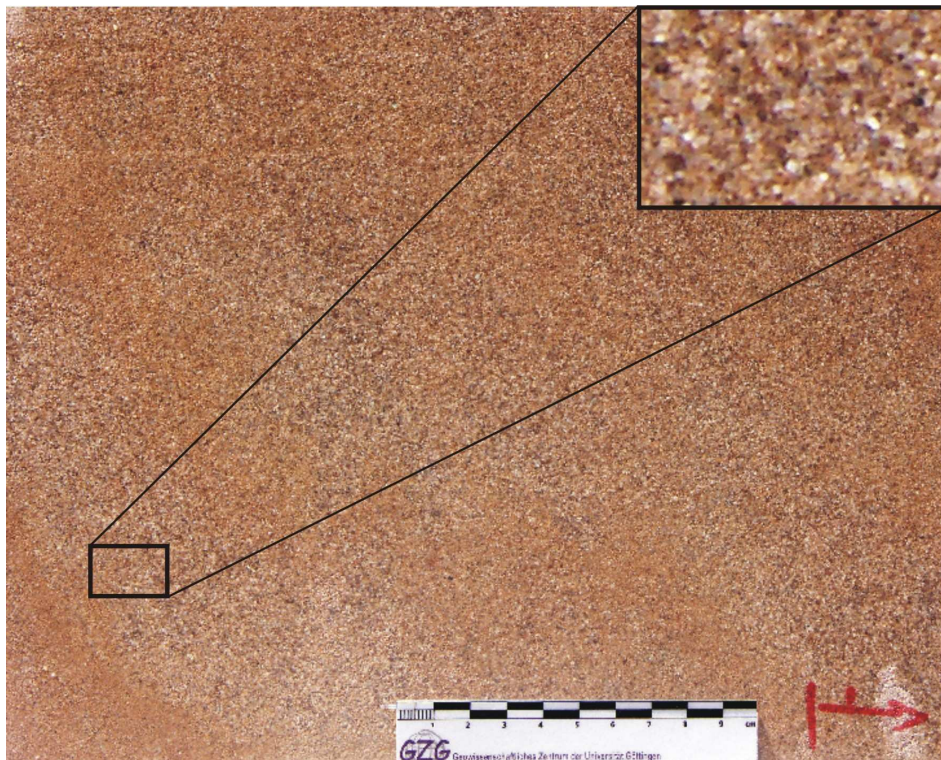


Figura 4.6: Bebertal, vista paralela a la estratificación.

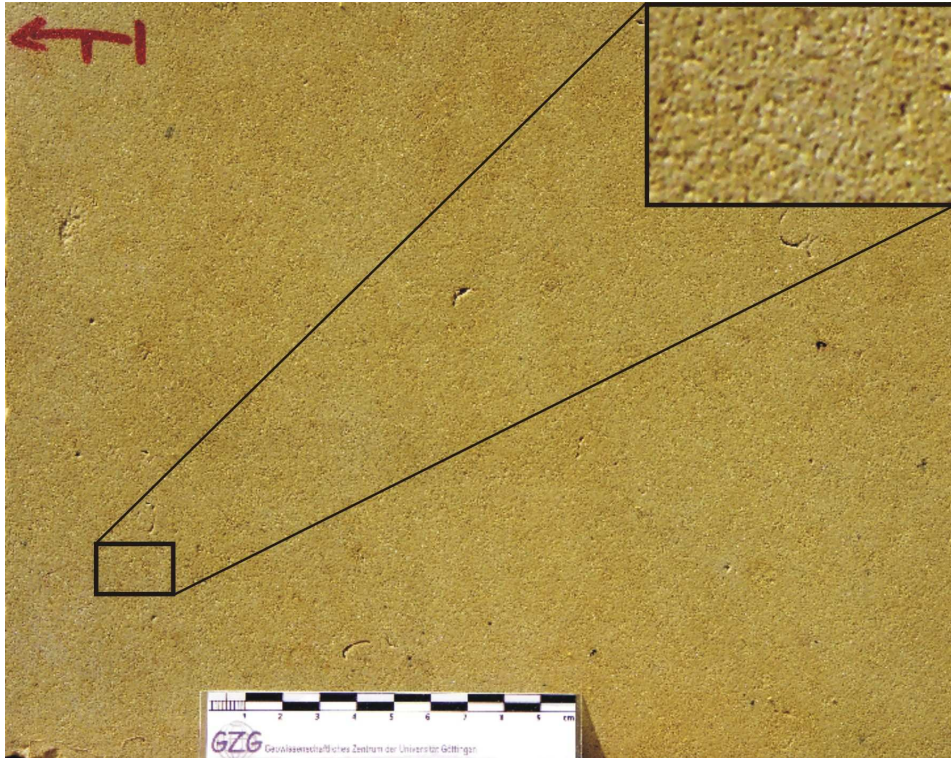


Figura 4.7: Obernkirchen, vista paralela a la estratificación.

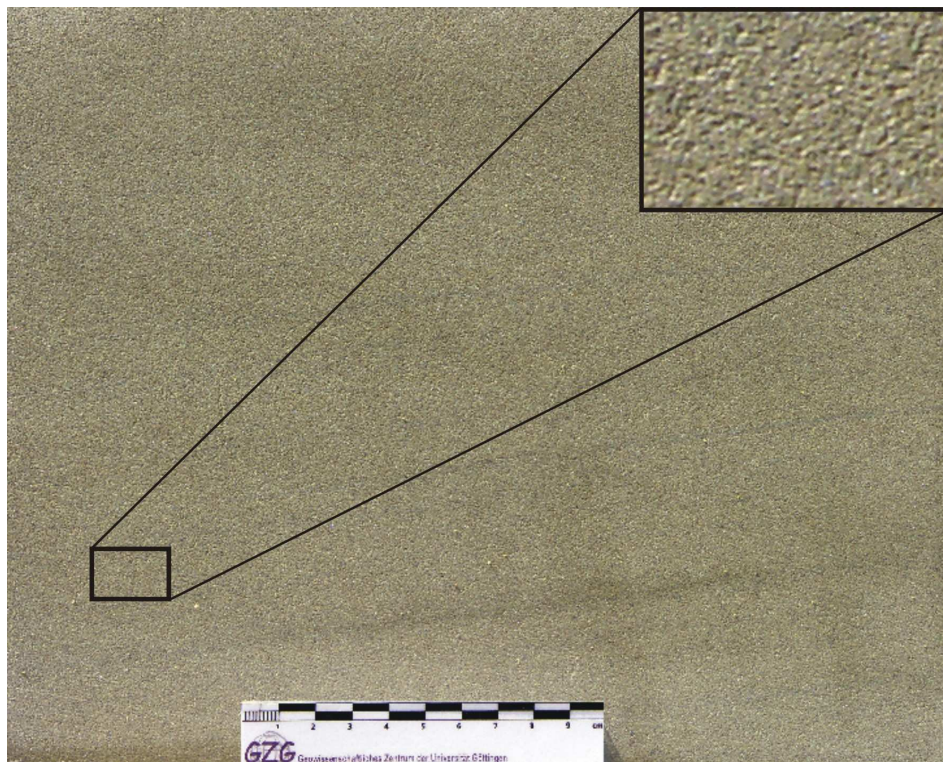


Figura 4.8: Sander, vista perpendicular a la estratificación.

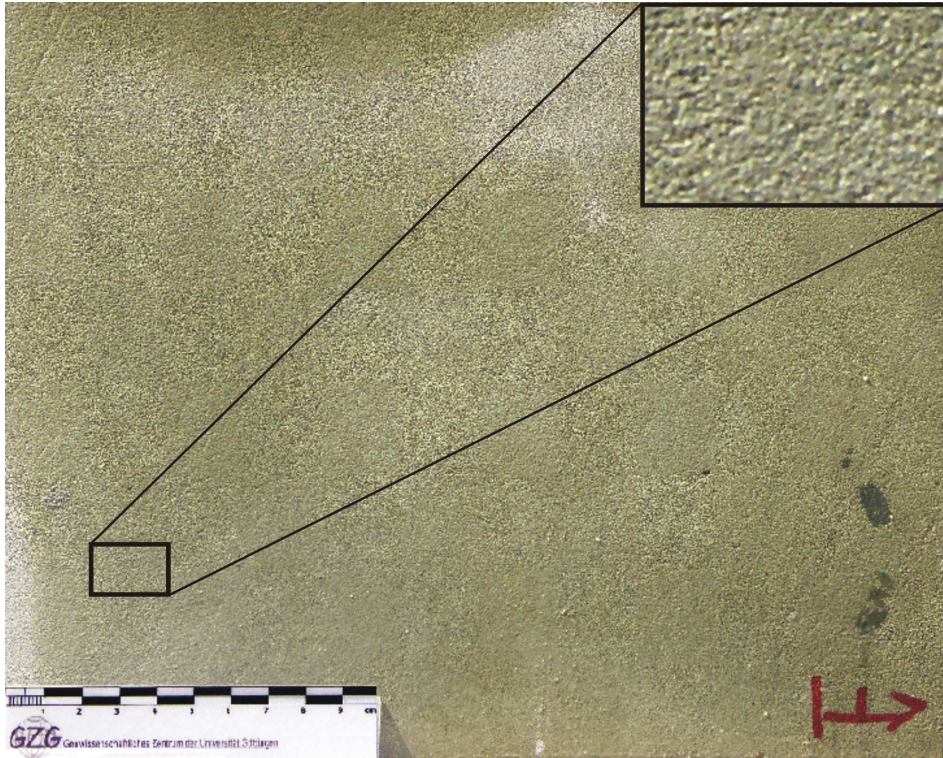


Figura 4.9: Schleierthaler, vista paralela a la estratificación.

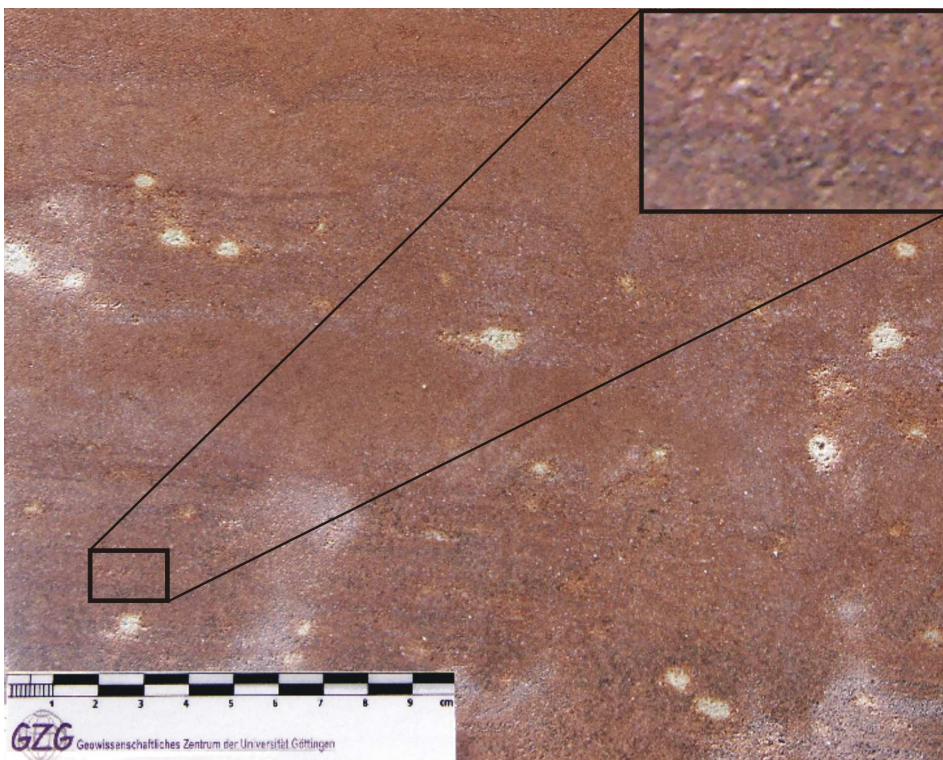


Figura 4.10: Tambach, vista perpendicular a la estratificación.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

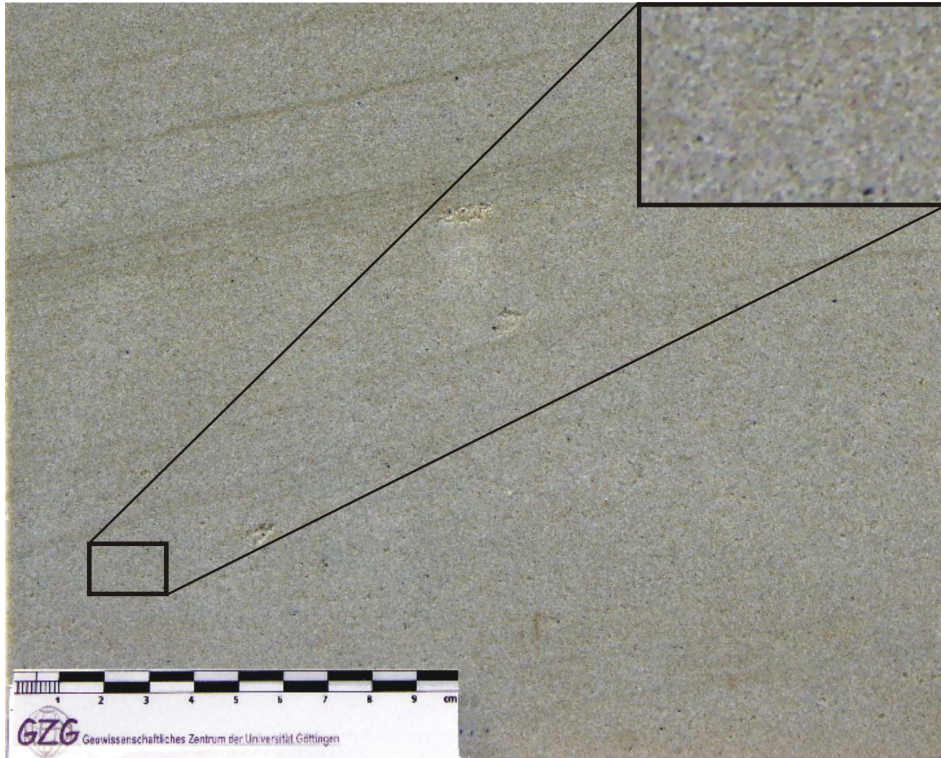


Figura 4.11: Weser grau, vista perpendicular a la estratificación.

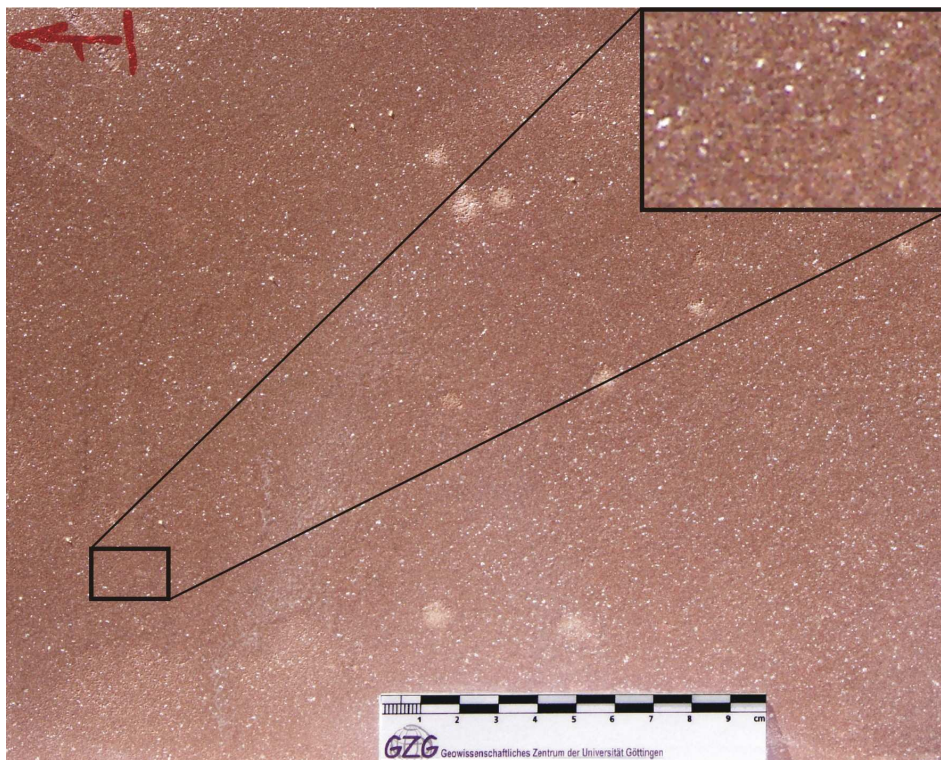


Figura 4.12: Weser rot, vista paralela a la estratificación.

5. Caracterización mineralógica y microestructural

Las areniscas fueron analizadas microscópicamente en la Facultad de Geociencias de la Universidad de Göttingen. Fueron utilizados un microscopio óptico (Leica DMLP) y un equipo de cátodo-luminiscencia.

Para describir las areniscas se prepararon para cada muestra tres láminas delgadas, dos perpendiculares a la estratificación y una paralela a esta. Las areniscas han sido clasificadas utilizando el sistema de clasificación de Dott, 1964 (ver Figura 4.2), considerando los componentes mayores de la arenisca (cuarzo, feldespato y fragmentos líticos) y el contenido de matriz.

El procedimiento comienza con una observación y descripción de la arenisca considerada en el microscopio óptico, luego completada por una observación de su cátodo-luminiscencia. En algunos casos la información obtenida por Difracción de Rayos X es utilizada para mejorar la caracterización mineralógica. Se exponen a continuación brevemente los fundamentos de la Cátodo-luminiscencia y la Difracción de Rayos X.

5.1. Cátodoluminiscencia

Como describe Miller (1991) luminiscencia es un fenómeno físico que ocurre cuando un sólido es "excitado" por alguna forma de energía y emite luz, si la energía activadora utilizada es un haz de electrones es llamada cátodo-luminiscencia (CL).

A nivel atómico, el input de energía del haz de electrones es totalmente absorbido por el átomo causando un salto cuántico, luego de un corto lapso de tiempo (10^{-8} s) este regresa a su nivel de energía previo y puede emitir radiación de varias formas: rayos alfa, beta o gamma y luz (como fotones), el último tipo es de interés para propósitos geológicos.

Siguiendo a Miller (1991) los centros de luminiscencia son dominios de imperfección en la red cristalina que atrapan energía del haz catódico que induce saltos en sus orbitales electrónicos. Los centros son de dos formas generales:

- a. Intrínsecos: independiente de la composición del medio de cristalización, debido a imperfecciones en la red cristalina como distorsiones en el crecimiento y otros defectos de la red cristalina.
- b. Extrínsecos: adquiridos del medio parental durante la cristalización, como impurezas en la superficie, en sitios intersticiales y en la red cristalina, o inhomogeneidades composicionales entre distintas partes del cristal.

Hay tres tipos distintos de centros de luminiscencia extrínsecos de acuerdo a su respuesta a la excitación del haz electrónico: centros activadores (donde la luminiscencia es muy probable), centros trampa (energía adicional es requerida para producir luminiscencia) y centros quencher o de apagado (poca o ninguna luminiscencia es emitida).

En materiales geológicos, la luminiscencia es normalmente controlada por un equilibrio entre centros de activación y de apagado.

En esta investigación fue utilizado el equipo de CL de la Facultad de Geociencias de la Universidad de Göttingen, el cual está a cargo del Dr. Alfons M. van den Kerkhof, quien también ayudó a la interpretación de las observaciones realizadas. El equipo funciona con un cátodo caliente (filamento de tungsteno) que requiere dos bombas de vacío (una mecánica y otra de difusión). El máximo voltaje de aceleración es 0,16 MV.

Las muestras son láminas delgadas de 30 micras pulidas y cubiertas con carbono. Las observaciones realizadas fueron documentadas y utilizadas para completar la descripción mineralógica.

5.2. Difracción de Rayos X

El método de Difracción de Rayos X es aplicado como un análisis cualitativo de la composición mineral de una muestra de roca. La Difracción de Rayos X es un fenómeno que resulta de la dispersión de los rayos X por los electrones de los átomos sin cambios en sus longitudes de onda. El patrón de difracción resultante, que consiste en posiciones e intensidades de líneas de difracción, es una propiedad física de una sustancia que es utilizada para su identificación y para el estudio de su estructura (Formoso, 1984).

Este método está basado en la Ley de Bragg **(1)** que relaciona la longitud de onda (λ) de la radiación X con la distancia entre los planos del cristal (d) y θ el ángulo complementario del ángulo de incidencia del rayo X, n es un número natural (figura 5.1).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Como la distancia d es característica de cada sustancia cristalina, el mineral puede ser identificado. Dependiendo de la muestra, una sustancia puede ser detectable si está presente en menos de 1% y otras pueden no reconocerse aún estando presente en un orden del 50%. En el caso de minerales arcillosos de muy baja cristalinidad la identificación puede ser muy difícil.

La preparación de la muestra es simple, consiste en pulverizarla en un mortero de ágata, con el fin de obtener un tamaño de grano de 5 a 10 micras.

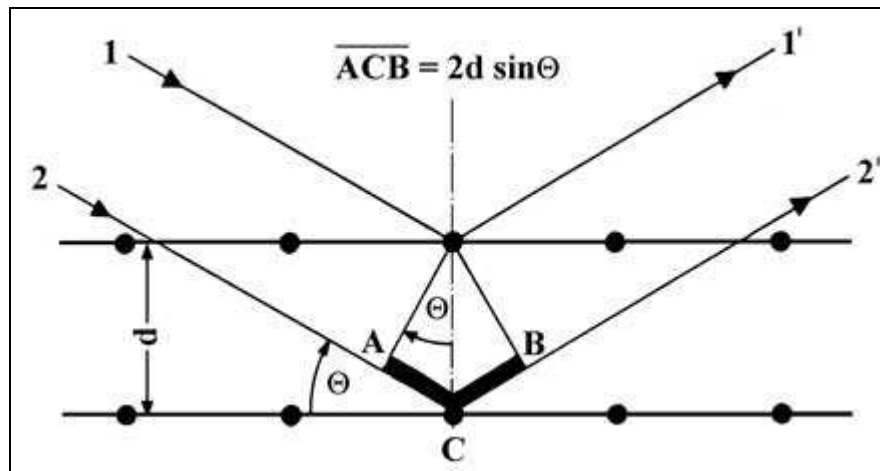


Figura 5.1: Diagrama mostrando la red cristalina y el haz de rayos X incidente.
(Fuente: <http://www.bruker-axs.de>).

Los resultados de la Difracción de Rayos X fueron utilizados para completar la descripción microscópica.

5.3. Descripción Microscópica

La descripción microscópica ha sido organizada para todas las areniscas estudiadas de modo que en el primer párrafo se describen las características petrográficas generales.

En el segundo párrafo se describe la distribución de la granulometría, incluyendo porcentajes de las distintas poblaciones y el grado de selección.

El párrafo siguiente describe la mineralogía de la arenisca, incluyendo los constituyentes principales y accesorios del esqueleto y de la matriz, si presente.

En el cuarto párrafo se describe el cemento, si está presente, considerando su naturaleza y su abundancia relativa.

El último párrafo describe la forma y redondez de los granos, la fábrica de la arenisca (los contactos entre los granos) y la textura general resultante de los contactos entre los granos del esqueleto y de la matriz.

A continuación de la descripción, pueden observarse fotos de CL y de microscopio petrográfico, así como los difractogramas resultantes de la Difracción de Rayos X.

α. Bad Bentheim

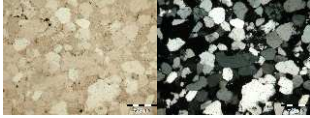


Lámina delgada 402 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 406 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 404 – perpendicular a la estratificación (CL)

La roca es una arenita cuarzosa de grano grueso y color blanco. El cemento es escaso y consiste en sobrecrecimientos de cuarzo sintaxial y pátinas de sericita y caolinita autigénica. La fracción detrítica está compuesta principalmente por granos de cuarzo, con una pequeña proporción de microclina, plagioclasa, muscovita, minerales opacos, circón, apatito y turmalina que son considerados como accesorios. También está presente una pequeña proporción de fragmentos líticos.

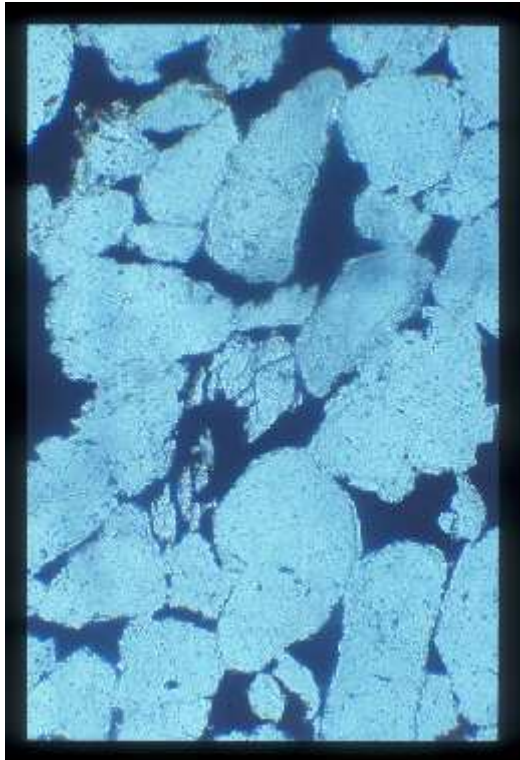
El tamaño máximo de grano de esta roca es 960 micras, teniendo un 90% de los granos tamaños cercanos a este valor. La selección es considerada buena a muy buena.

Los granos de cuarzo representan un 97-98% de los granos detríticos, la mayoría de ellos (90%) son monocristalinos y presentan extinción ondulosa. Algunos muestran microfracturas (porosidad secundaria) e inclusiones fluidas. Se evidencia sobrecrecimiento autigénico por la presencia de granos de cuarzo euhédricos.

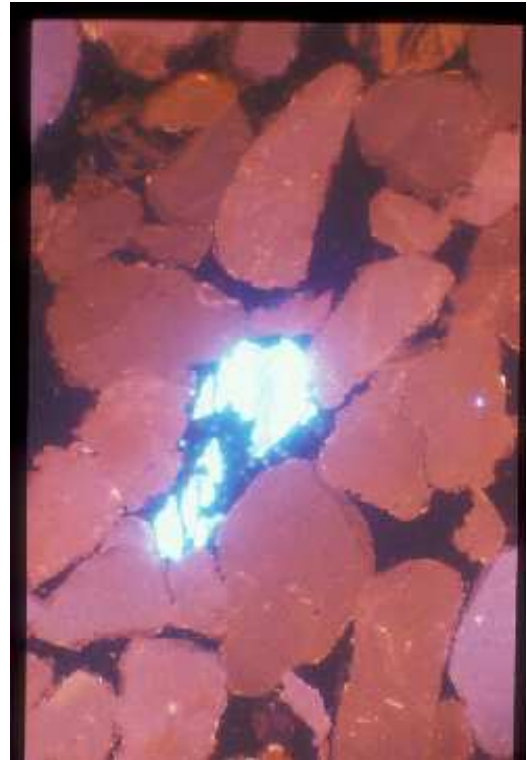
Los minerales accesorios son microclina, albita autigénica de forma irregular, muscovita, minerales opacos, circón, apatito y turmalina, todos juntos representando no más del 2 a 3% de la fracción detrítica. Las muscovitas presentan una relación axial de hasta cuatro.

Pátinas de sericita no son muy frecuentes, pero en algunos casos hacen visible un sobrecrecimiento de cuarzo sintaxial muy delgado. El cemento también está presente en agregados de caolinita autigénica con forma de librillos que están distribuidos aleatoriamente. En CL el cemento silíceo es visible como un sobrecrecimiento muy fino y la caolinita aparece con un color azul muy brillante.

Los granos son redondeados a subredondeados, con contactos longitudinales en la mayoría de los casos, aunque también existen contactos cóncavo-convexos y suturados. Los mismos son esféricos y prolados. La textura es grano soportada.



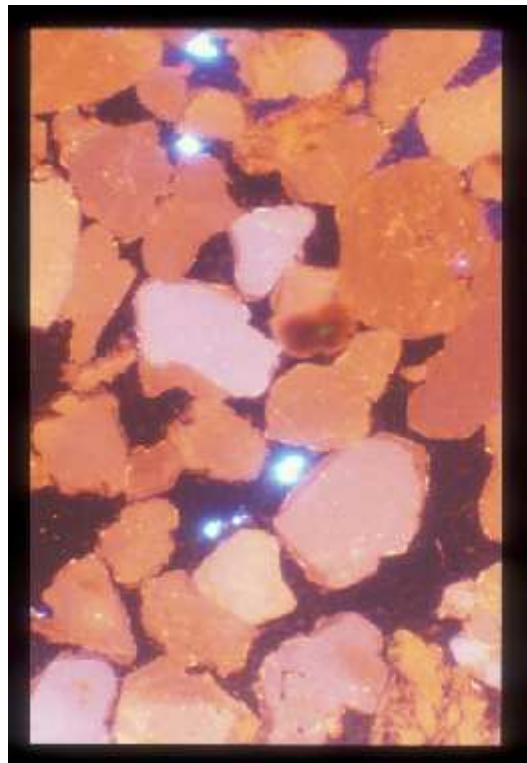
a



b



c



d

Figura 5.2:

a y b: Bad Bentheim en luz polarizada plana (LPP) y mostrando colores de CL, respectivamente. En azul brillantes se observa albita autigénica irregular. Sobrecrecimiento sintaxial de sílice muy fino se observa en rojo más oscuro que los granos de cuarzo que rodea. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

c: Bad Bentheim en colores de CL: Caolinita autigénica es visible en el centro de la foto en azul oscuro. Microclina es visible en azul brillante. Ancho de la foto 3 mm aprox.

d: Bad Bentheim en colores de CL: Sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible en color rojo alrededor de algunos granos de cuarzo. Microclina es visible en azul brillante. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

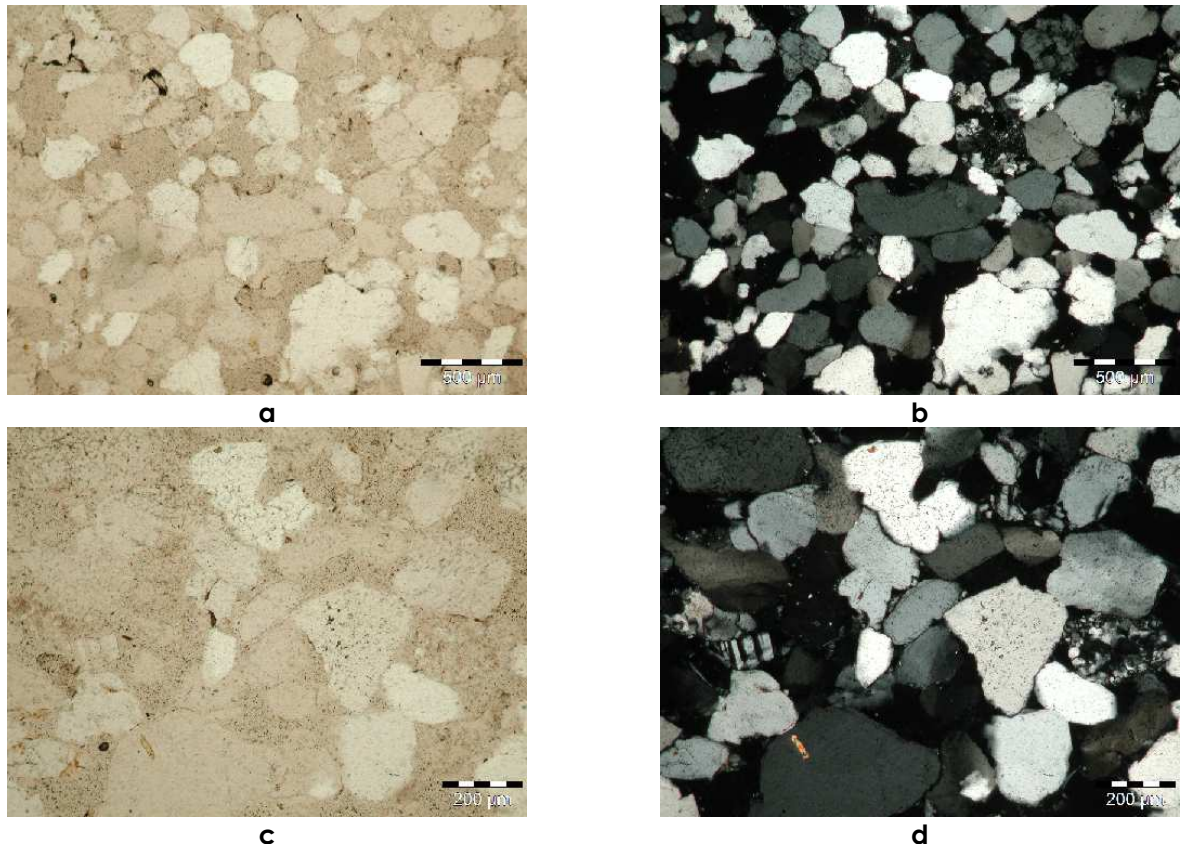


Figura 5.3:

a y b: Bad Bentheim, en luz plana polarizada (LPP) y polarizadores cruzados (PC), respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Granos sub-redondeados de cuarzo son los componentes principales. Un grano de feldespato es visible en la esquina superior derecha de la foto.
c y d: Bad Bentheim, en LPP y PC, respectivamente. Un grano en el centro de la foto muestra un delgado sobrecrecimiento sintaxial de sílice. Un grano de microclina mostrando la típica macla en parrilla se puede observar a la izquierda de la foto. A la derecha se observa un grano policristalino de cuarzo.

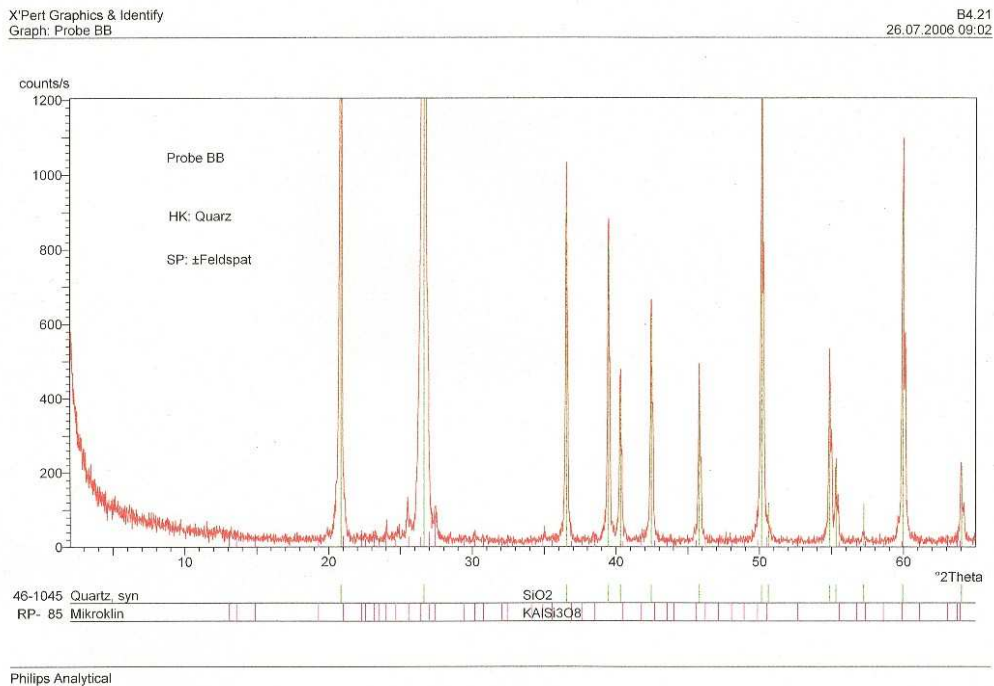


Figura 5.4: Difractograma de Bad Bentheim. Los minerales detectados son cuarzo y microclina.

b. Bebertal

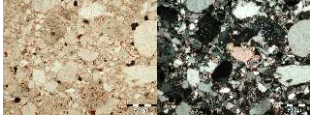


Lámina delgada 393 – paralela a la estratificación
Lámina delgada 394 – perpendicular a la estratificación
Lámina delgada 405 – perpendicular a la estratificación (CL)

Esta roca es una sublitarenita de grano muy grueso y color rosado. El cemento consiste en parches de calcita, sobrecrecimientos sintaxiales de sílice, sobrecrecimientos sintaxiales de calcita, sobrecrecimientos autigénicos de feldespato, pátina de sericita y escasos parches de óxido de hierro. La fracción detrítica está representada por cuarzo, feldespato, muscovita y fragmentos líticos. Los accesorios identificados son minerales opacos, apatito, rutilo, turmalina y circón.

Los granos mayores tienen 1,5 milímetros. Estos representan el 10% del esqueleto. Los granos más finos tienen alrededor de 70 micras, este valor corresponde a arena muy fina. La mayoría de los granos tienen una granulometría entre los dos valores límite. La selección se considera pobre a moderada.

El componente principal es cuarzo, representando un 90% de todos los granos. Alrededor de la mitad de estos son policristalinos y la mayoría presentan extinción ondulosa.

El feldespato está representado por plagioclasa y microclina, en un 2 a 3%. Los feldespatos alcalinos están alterados por los carbonatos y muchos de los granos muestran porosidad secundaria como resultado de su disolución durante la diagénesis.

La muscovita presenta una relación axial de hasta seis y está presente en alrededor del 1% de la fracción detrítica de esta roca. Los granos de carbonato están presentes en menos del 1% y su composición es de calcita. Los fragmentos líticos, la mayoría de ellos fragmentos volcánicos y sedimentarios, representan alrededor del 5% de los granos detríticos. Los accesorios identificados son minerales opacos (alrededor del 1% de la fracción detrítica), apatito, rutilo, turmalina y circón (todos ellos alrededor del 1% de los granos).

El cemento está representado principalmente por parches muy frecuentes de calcita, en algunos casos aparece zoneada; los cristales algunas veces son tan grandes que muestran maclas y clivaje. Parches de óxido de hierro son escasos. El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es común, en la mayoría de los casos visible porque una pátina de sericita preserva la forma original de los granos, fenómeno que ocurre también con el sobrecrecimiento sintaxial de calcita y el sobrecrecimiento autigénico de feldespato.

Los granos son redondeados a subredondeados, comúnmente de forma esférica y prolada. Los granos prolados tienen una relación axial de hasta seis. Los granos tienen principalmente contactos puntuales. Esta roca presenta una textura grano-soportada.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

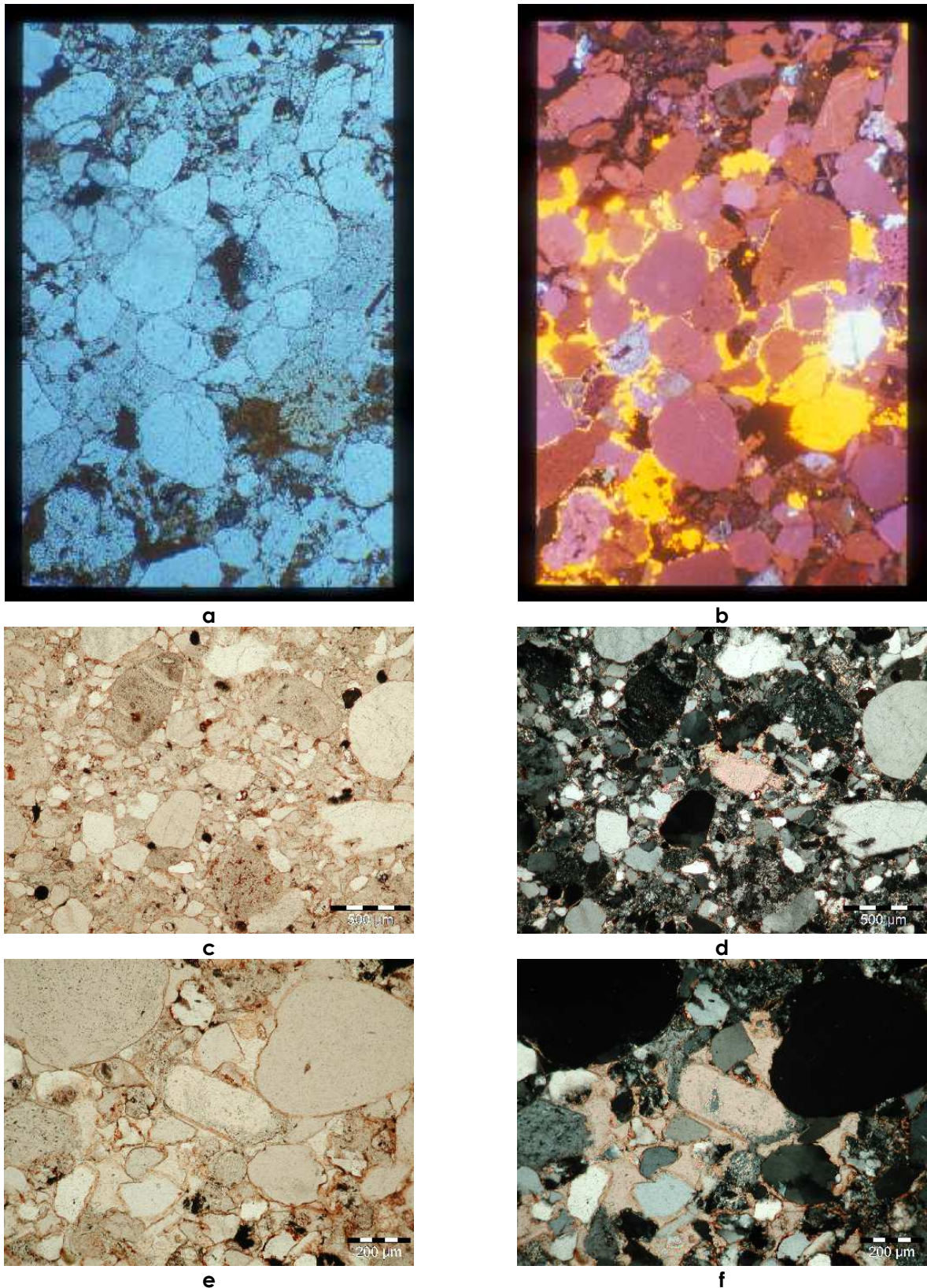


Figura 5.5:

a y b: Bebertal en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. Granos de cuarzo en colores rojos y rosados. Cemento de calcita en amarillo a anaranjado brillante. Algunos granos de cuarzo muestran microfracturas rellenas de calcita. En la derecha de la foto se ve un grano de microclina en azul brillante. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

c y d: Bebertal, en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Cuarzo, calcita y fragmentos líticos componen los granos.

e y f: Bebertal, en LPP y PC, respectivamente. Un grano de feldespato es visible a la izquierda de la foto. En el centro un grano de calcita rodeado de parches de cemento calcítico.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

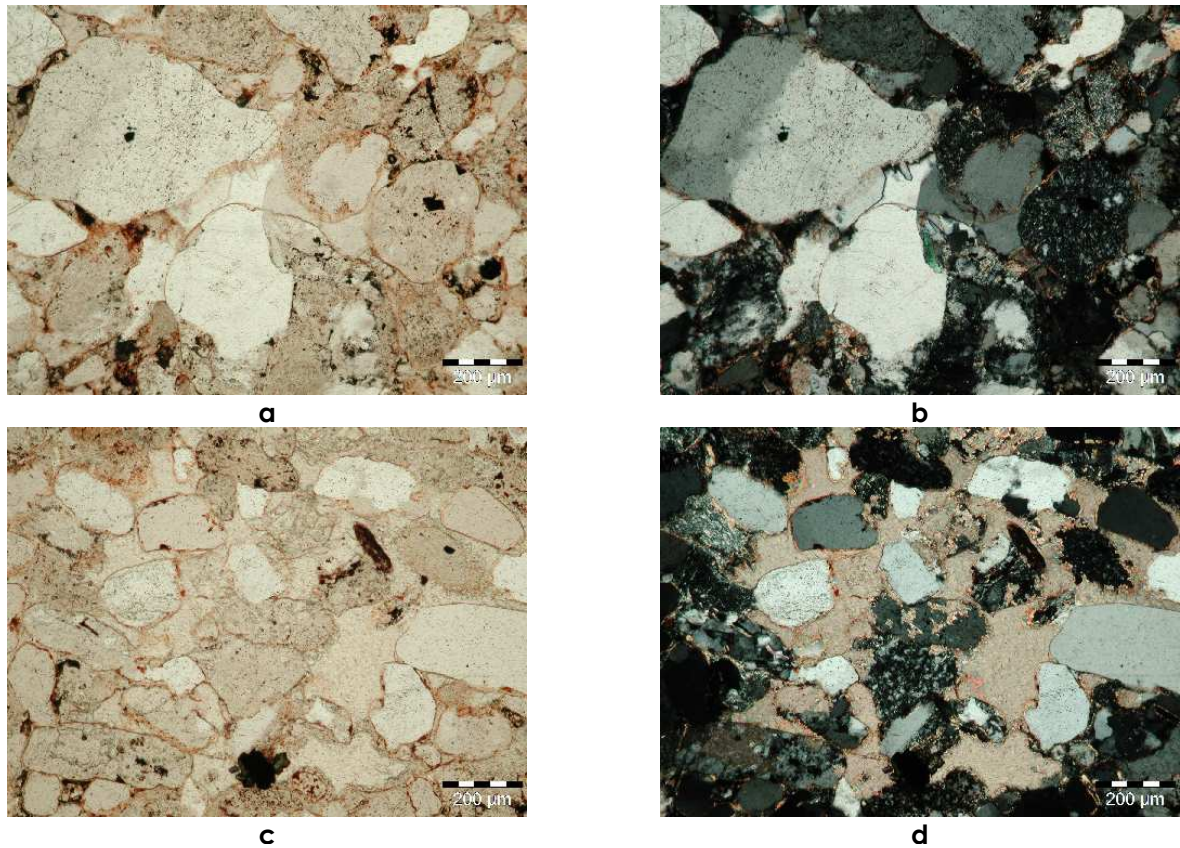


Figura 5.6:

a y b: Bebertal, en LPP y PC, respectivamente. Sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible en PC en el centro de la foto. Fragmentos líticos son visibles a la derecha de la foto.

c y d: Bebertal, en LPP y PC, respectivamente. Se observa, en el centro de la foto, un parche de calcita ocupando el espacio de poros y reemplazando parcialmente un grano de feldespato.

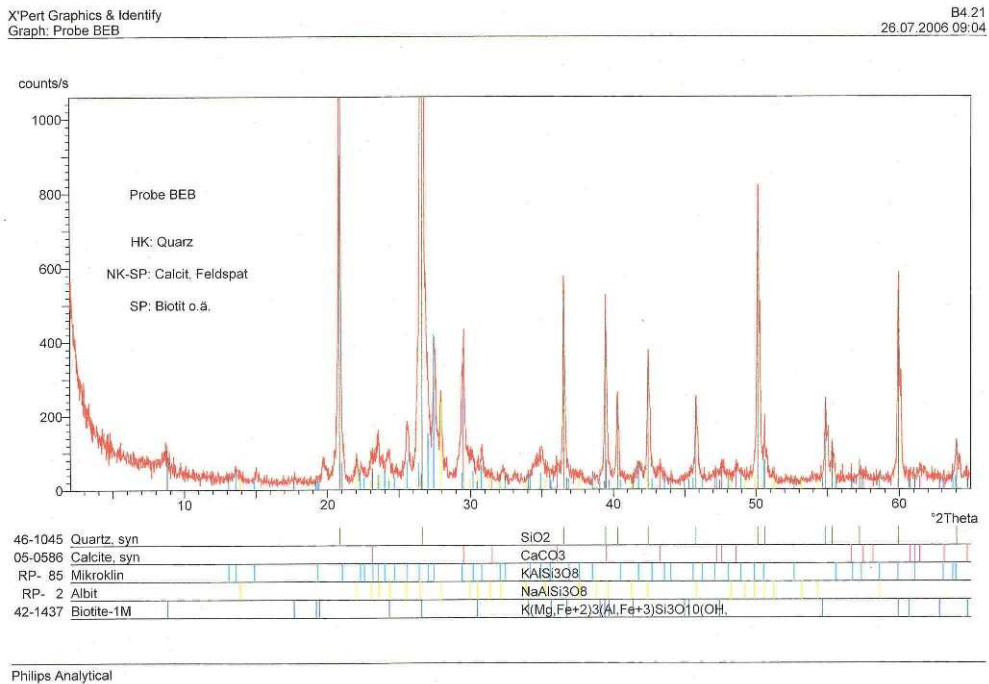


Figura 5.7: Difractograma de Bebertal. Los minerales detectados son cuarzo, calcita, microclina, albita y biotita.

c. Obernkirchen

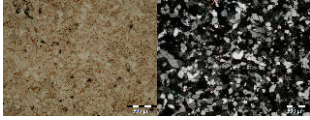


Lámina delgada 411 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 400 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 388 – perpendicular a la estratificación (CL)

Esta roca es una arenita cuarzosa de grano medio y color blanco a anaranjado. El cemento está compuesto por escasa sílice, parches de óxido de hierro y caolinita autigénica. Los granos están compuestos por cuarzo, muscovita, circón, turmalina, rutilo y minerales opacos.

Los granos más gruesos tienen un tamaño de 300 micras, un 90 a 95% de los granos tienen un tamaño entre este valor y 100 micras. La selección se considera moderada a buena.

El cuarzo es el componente principal de la fracción detrítica (98%); la mayoría presenta extinción ondulosa y un 95% es monocristalino.

La muscovita es rara y presenta una relación axial de hasta nueve.

Los minerales accesorios, 1 a 2% de los componentes detríticos, son minerales opacos, circón, turmalina y rutilo.

El cemento está compuesto por escasa sílice, parches de óxido de hierro y caolinita autigénica, que aparece en agregados con forma de librillos. Probablemente también hay sobrecrecimiento sintaxial de sílice, pero la forma original de los granos no fue observada.

Los granos son redondeados a sub-redondeados, sub-esféricos y prolados con una relación axial de hasta cuatro. La mayoría de los contactos entre granos son cóncavo-convexos y suturados, pero también hay contactos planares. La textura es grano soportada.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

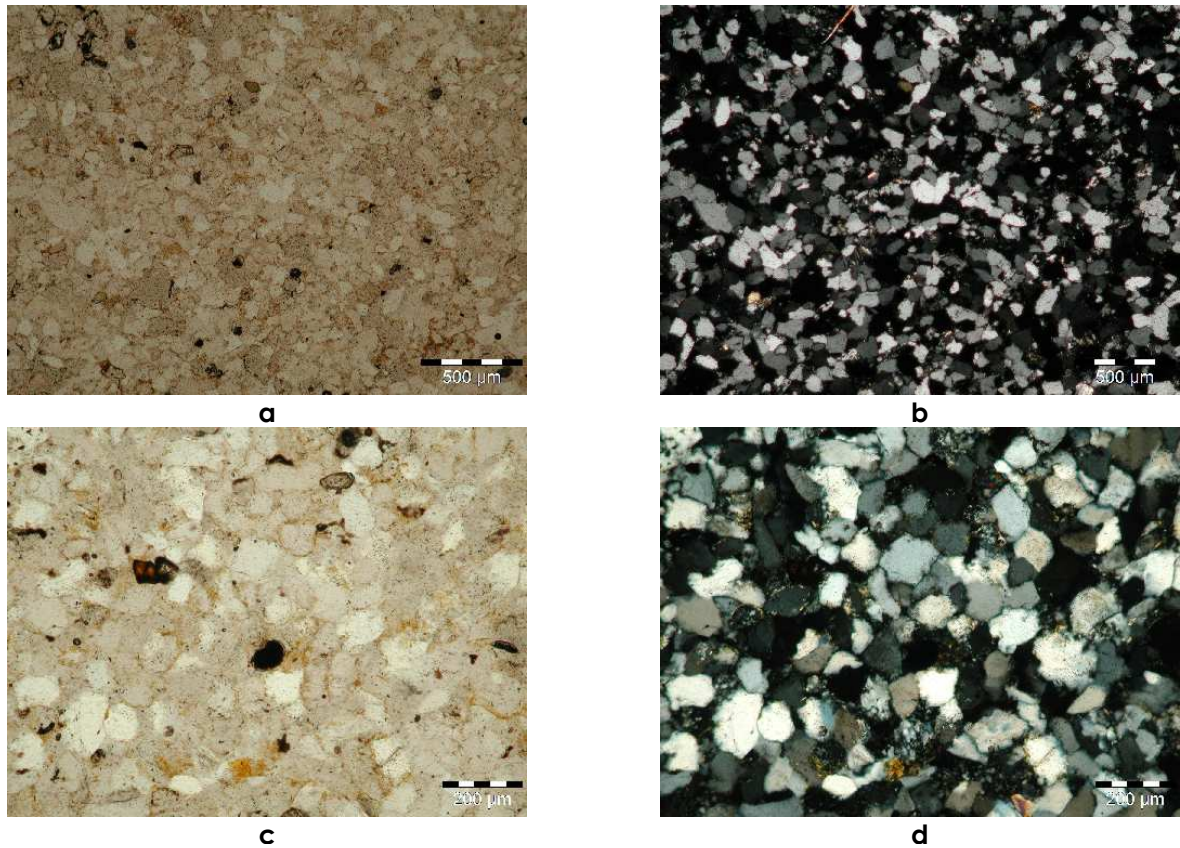


Figura 5.8:

a y b: Obernkirchen en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Se puede ver que el cuarzo es el principal componente. Algunos minerales opacos se pueden ver diseminados en la roca.

c y d: Obernkirchen en LPP y PC, respectivamente. Los granos sub-angulares a sub-redondeados de cuarzo son los principales componentes de la roca. Un grano de rutilo es visible en la esquina superior izquierda de la foto.

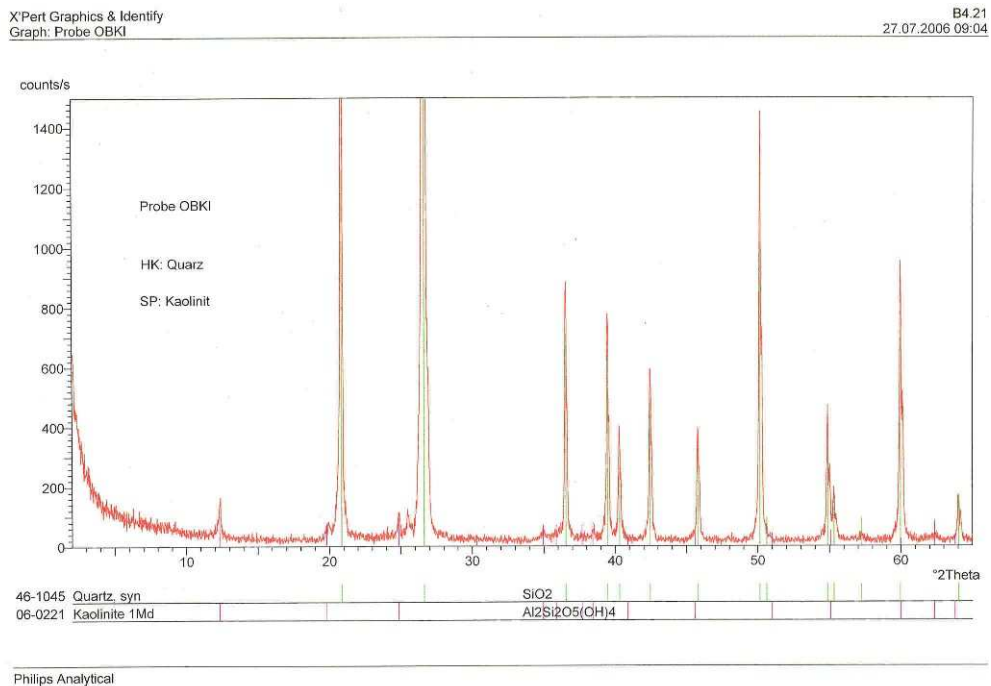


Figura 5.9: Difractograma de Obernkirchen. Los minerales detectados son cuarzo y caolinita.

d. Sander

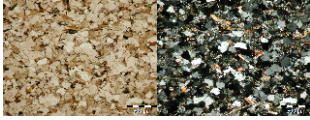


Lámina delgada 389 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 399 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 381 – perpendicular a la estratificación (CL)

Esta arenisca se clasifica como una sublitarenita de grano medio y color verde con puntos amarillos. El cemento está principalmente compuesto por sobrecrecimiento sintaxial de sílice, parches de carbonato y óxido de hierro y pátinas de óxido de hierro. Agregados de arcilla componen una pseudomatriz. La fracción detrítica está compuesta principalmente por cuarzo, feldespato, filosilicatos y fragmentos líticos. Apatito, circón, turmalina y rutilo son los minerales accesorios.

El tamaño máximo de la fracción detrítica es 310 micras. Alrededor de un 80% de los granos tienen este tamaño. La fracción más fina está compuesta por limo grueso. Una pseudomatriz está presente, al aplastarse granos de arcilla entre granos de cuarzo, resultando en zonas donde este material muy fino se comporta como una matriz. La selección es considerada pobre a moderada.

El cuarzo es alrededor del 80% de la fracción detrítica, alrededor de un 95% de estos son monocristalinos y la mayoría presentan extinción ondulosa. Son de dos orígenes distintos: metamórficos e ígneos.

El feldespato está representado principalmente por plagioclasa, pero también se pueden encontrar algunas microclinas; está presente en un 3% de los granos detríticos. Presentan fenómenos de alteración.

Los filosilicatos están representados por muscovita, biotita alterada y clorita. Láminas de clorita y de un filosilicato con pleocroísmo de marrón claro a marrón probablemente representen el resultado de la alteración de biotita. Son alrededor de un 3 a 5% de los granos detríticos.

Minerales opacos, apatito, circón, turmalina y rutilo son los minerales accesorios de esta roca; todos juntos representan un 1% de la fracción detrítica.

Los fragmentos líticos son principalmente granos sedimentarios y volcánicos. Representan de un 10 a un 15% de los granos de esta roca.

El cemento es escaso y está distribuido uniformemente. Está representado por sobrecrecimiento sintaxial de sílice y parches de calcita y óxido de hierro. El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible debido a que una pátina de óxido de hierro muestra la forma original de los granos.

Predominan los granos sub-angulares y sub-redondeados; sus contactos son principalmente planares y cóncavo-convexos. Los granos son esféricos y prolados con una relación axial de hasta cuatro. La textura de la roca es grano soportada.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

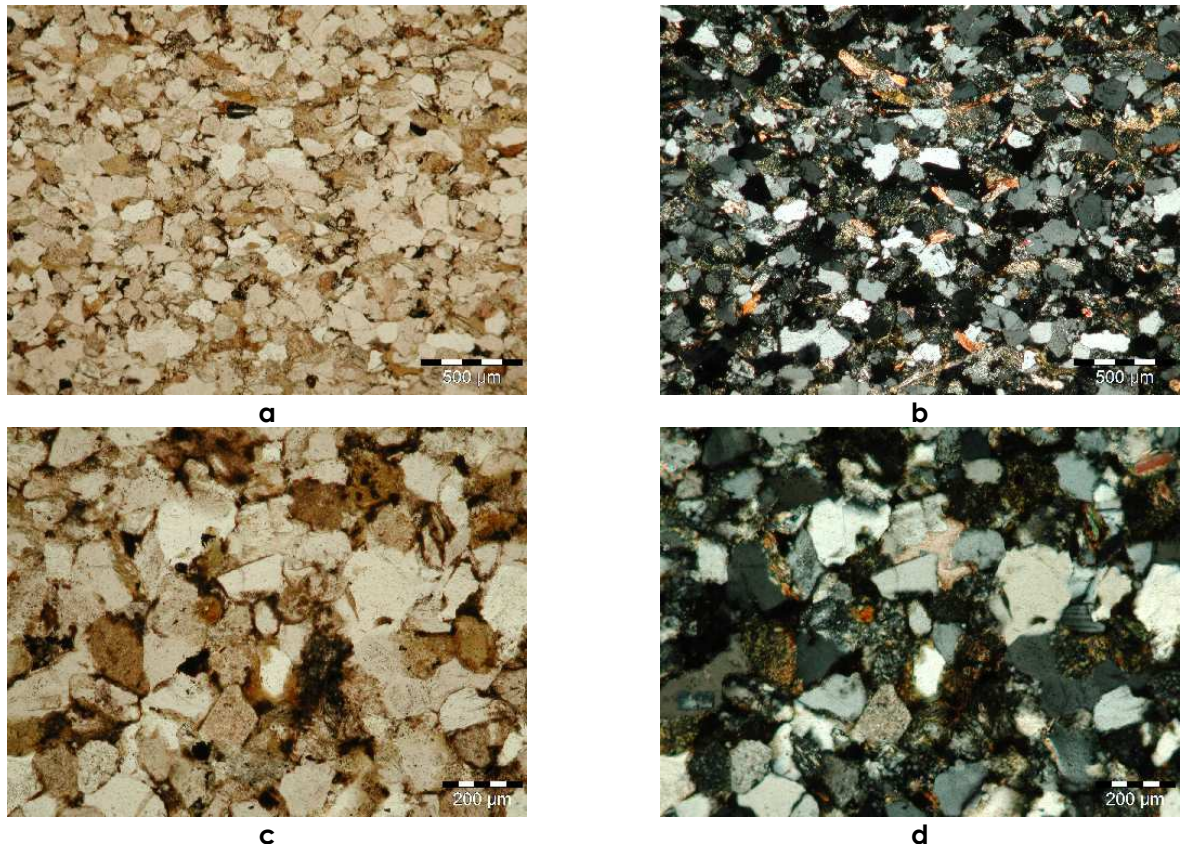


Figura 5.10:

a y b: Sander en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Los granos de cuarzo se ven inmersos en una pseudo-matriz "sucia" junto a otros granos de filosilicatos como la muscovita visible en la parte superior de la foto.

c y d: Sander en LPP y PC, respectivamente. Se observa un pequeño parche de calcita en la parte superior central de la foto. Cuarzos límpidos, feldespatos, filosilicatos y fragmentos líticos son los principales componentes de la roca.

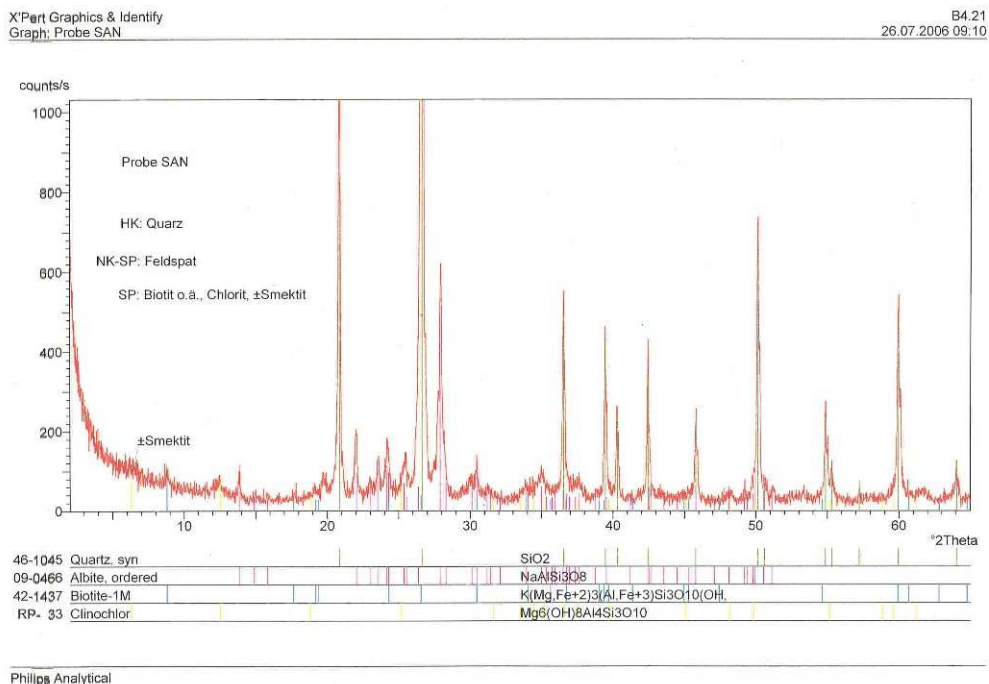


Figura 5.11: Difractograma de Sander. Los minerales detectados son cuarzo , albite, biotita y clorita (clinoclhor). Obsérvese el posible máximo de esmektita.

e. Schleeriether

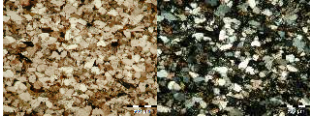


Lámina delgada 398 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 397 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 392 – perpendicular a la estratificación (CL)

La roca es una sublitarenita de grano medio y color verde. El cemento es escaso y consiste en parches de calcita y sobrecrecimiento sintaxial de sílice. Agregados de arcilla componen una pseudomatriz. Los granos detríticos están compuestos principalmente por cuarzo, seguido de fragmentos líticos y una proporción menor de feldespatos. Muscovita, clorita, minerales opacos, turmalina, apatito y circón son los principales minerales accesorios.

La fracción detrítica está compuesta principalmente por granos con un máximo de 440 micras, que corresponde a arena de grano medio y una pequeña cantidad, no más de 5%, es limo grueso. Un mineral de grano muy fino y color amarillo identificado como arcilla parece componer la matriz, pero probablemente este componente era originalmente clástico y durante la compactación fue aplastado entre granos de cuarzo, transformándose en una pseudomatriz. La selección es considerada pobre a moderada.

El cuarzo representa un 80% de la fracción detrítica; más del 95% es monocristalinos y un 50% presenta extinción ondulosa. Muchos están orientados con su eje más largo paralelo al plano de estratificación.

No más de un 15% de los granos detríticos corresponden a fragmentos líticos, la mayoría de ellos sedimentarios y volcánicos en origen. Los feldespatos son plagioclasa y microclina y son el 3% de los minerales presentes.

Muscovita, clorita, minerales opacos, turmalina, apatito y circón son los accesorios, cada uno presente en menos del 1% de los granos de la roca. La muscovita tiene normalmente una relación axial de hasta seis. La clorita es probablemente el resultado de la alteración de la biotita, preserva su forma y las dimensiones son como las de las muscovitas que se hallan presentes. La turmalina presenta un claro pleocroísmo entre transparente a verde y azul y es muy claro que presenta un sobrecrecimiento antigénico. Los circones son muy redondeados. La turmalina y el circón no son tan frecuentes como los demás accesorios. Los minerales opacos son muy redondeados y están distribuidos homogéneamente en la roca.

El cemento es escaso y consiste en parches de calcita homogéneamente distribuidos, en algunos casos la dimensión de los cristales es tan grande que las maclas y el clivaje son fácilmente visibles. Se observa sobrecrecimiento sintaxial de sílice, pero no es tan frecuente; se identifica porque en algunos casos una pátina de óxido de hierro muestra la forma original de los granos.

La textura de la roca es grano soportada. Los granos son sub-angulosos a sub-redondeados, los contactos son en su mayoría planares pero también hay algunos cóncavo-convexos y en menor proporción suturados. La mayoría son prolados, con una relación axial de hasta cinco, pero también hay algunos granos sub-esféricos.

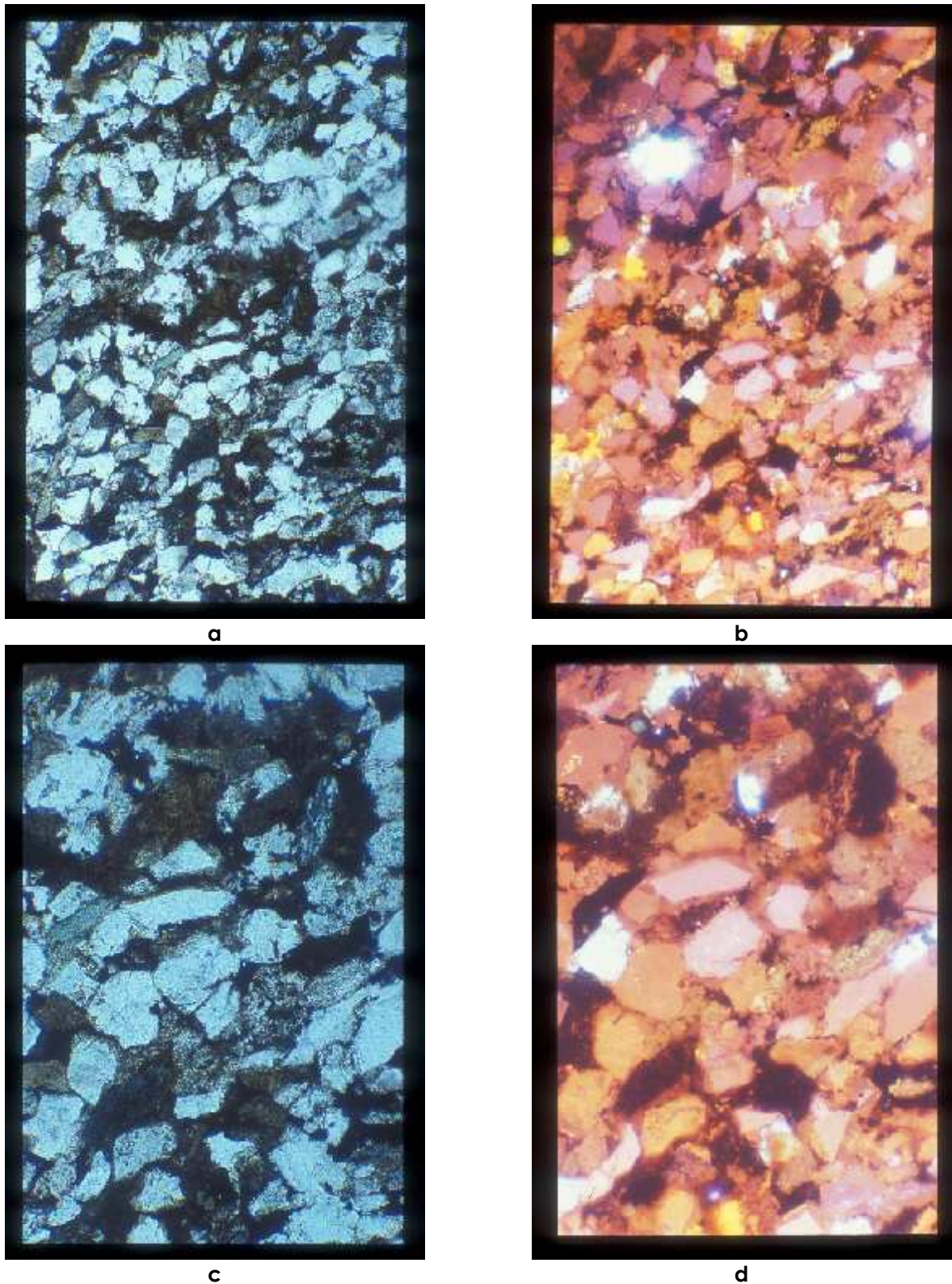


Figura 5.12:

a y b: Schleeriether en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. Se observan granos de cuarzo con colores de CL rosados, algunos rodeados por el cemento silíceo en tonos más oscuros. Los granos de color de CL azul brillante son plagioclasas. Muchos granos no muestran luminiscencia, esto es debido a su alto contenido en centros de apagado, estos son los granos que conforman la pseudo-matriz. Ancho de la foto 3 mm aprox.

c y d: Schleeriether en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. Los granos de cuarzo en CL presentan colores rojos claros y rosados, mostrando un sobrecrecimiento sintaxial de sílice fino en tonos más oscuros. Los granos en azul brillante en CL son de plagioclasa. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

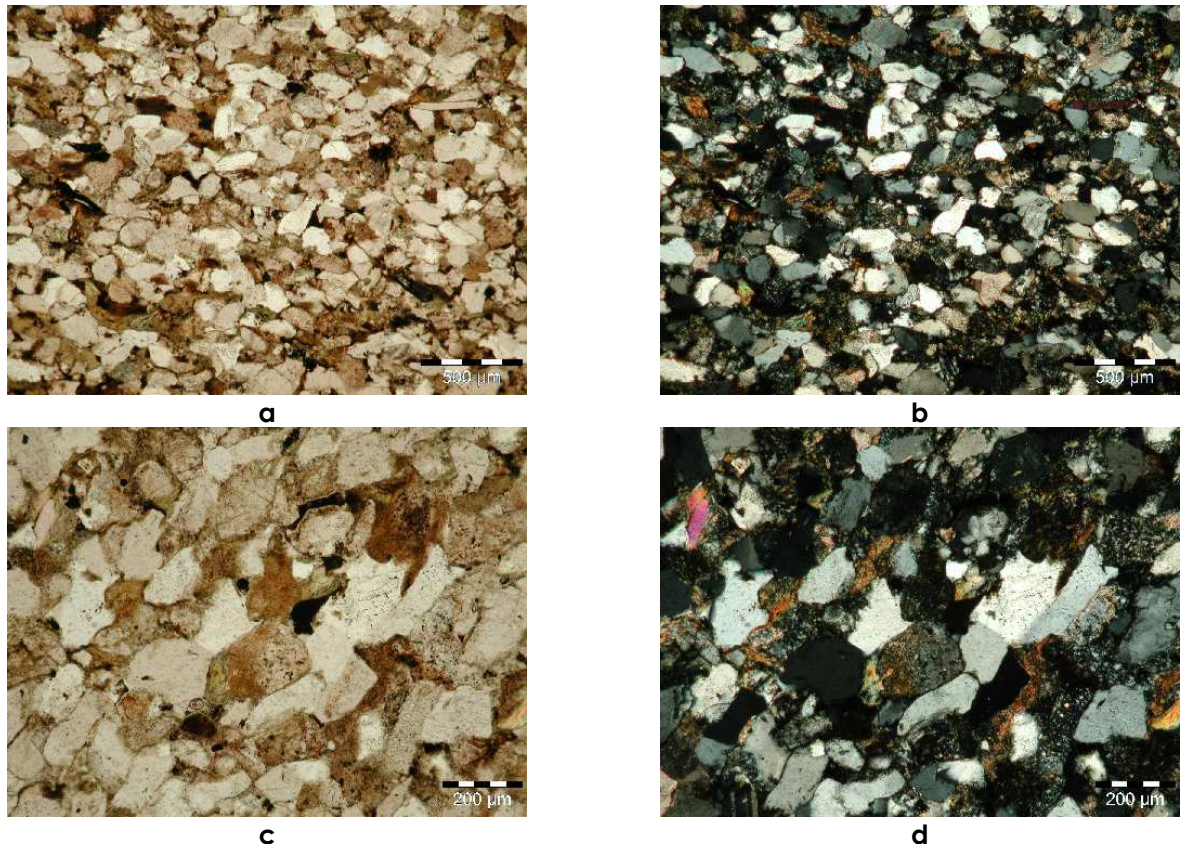


Figura 5.13:

a y b: Schleiether, en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Cuarzo, feldespato, fragmentos líticos y filossilicatos son los principales componentes detríticos.

c y d: Schleiether, en LPP y PC, respectivamente. Se pueden observar granos de cuarzo y fragmentos líticos, así como también algunos feldspatos. En l a esquina superior izquierda de la foto se puede observar un grano de muscovita. En LPP se ven algunos minerales opacos.

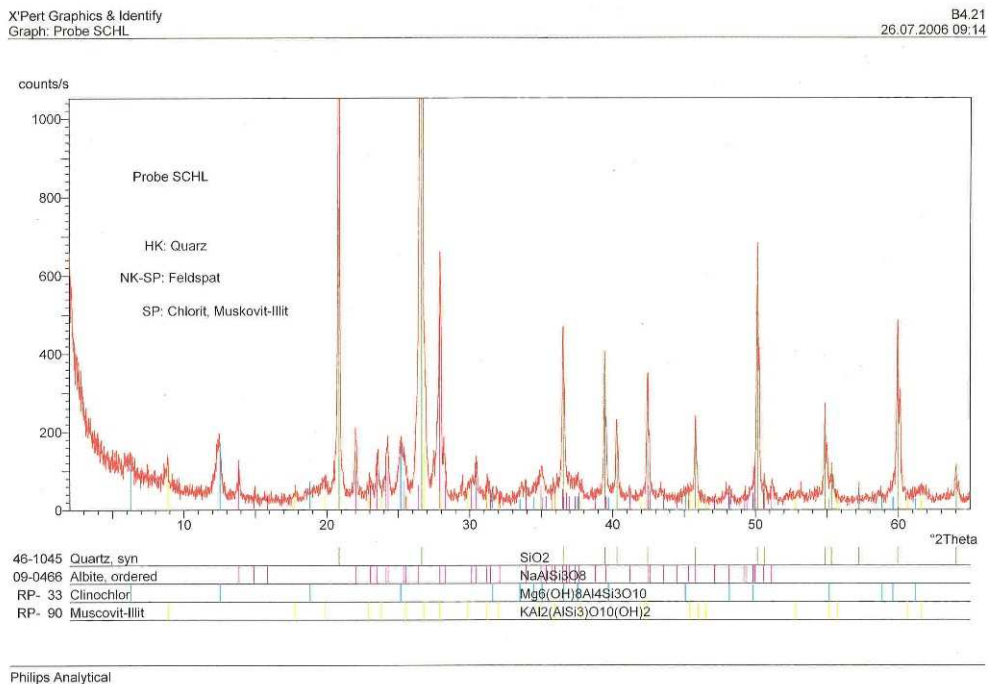


Figura 5.14: Difractograma de Schleiether. Los minerales detectados son cuarzo, albita, clorita (clinocloro) y muscovita -illita.

f. Tambach

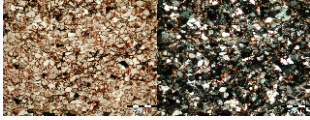


Lámina delgada 410 – paralela a la estratificación
Lámina delgada 403 – perpendicular a la estratificación
Lámina delgada 407 – perpendicular a la estratificación (CL)

Esta muestra es una arenita cuarzosa de grano medio y color rojo. El cemento es abundante y está compuesto por sobrecrecimiento sintaxial de sílice, sobrecrecimiento autigénico de feldespato, pátinas y parches de óxido de hierro y parches de calcita. La fracción detrítica consiste principalmente en granos de cuarzo y feldespato. Menos frecuente se encuentra muscovita, minerales opacos, apatito, rutilo, circón (considerados como minerales accesorios) y fragmentos líticos.

Los granos más grandes tienen una granulometría entre 380 y 220 micras, estos representan el 20% de esta fracción. Alrededor de un 80% de los granos tienen un tamaño entre 40 y 100 micras, que corresponde a limo muy grueso a arena muy fina; estos son los componentes más finos del esqueleto. La selección es pobre a moderada.

La mineralogía está representada predominantemente por cuarzo (alrededor de un 95%), algunos de ellos muestran extinción ondulosa y alrededor del 2% es policristalino, siendo el resto monocristalino.

El feldespato es alrededor del 2 a 3% de la fracción detrítica, representado principalmente por plagioclasa, pero algunos granos de microclina están presentes.

Muscovita y clorita son aproximadamente 2% de los granos de la roca, con una relación axial de hasta 12.

Apatito, circón y minerales opacos son menos del 1% de los granos y son muy redondeados.

Los fragmentos líticos están presentes en un 1% y su composición es muy difícil de identificar debido al pequeño tamaño de sus constituyentes.

El cemento es muy abundante representado por sobrecrecimiento sintaxial de sílice, parches de calcita, sobrecrecimiento autigénico de feldespato, parches y pátinas de óxido de hierro (hematita). El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible dado a que la pátina de óxido de hierro preserva la forma original de los granos de cuarzo.

Se puede observar una orientación preferencial de los granos, estando los ejes más largos paralelos al plano de estratificación. Los granos son sub-angulares a sub-redondeados; los contactos son principalmente planares pero también existen contactos cóncavo-convexos; son esféricos y prolados con una relación axial de hasta 12. La textura es grano soportada.

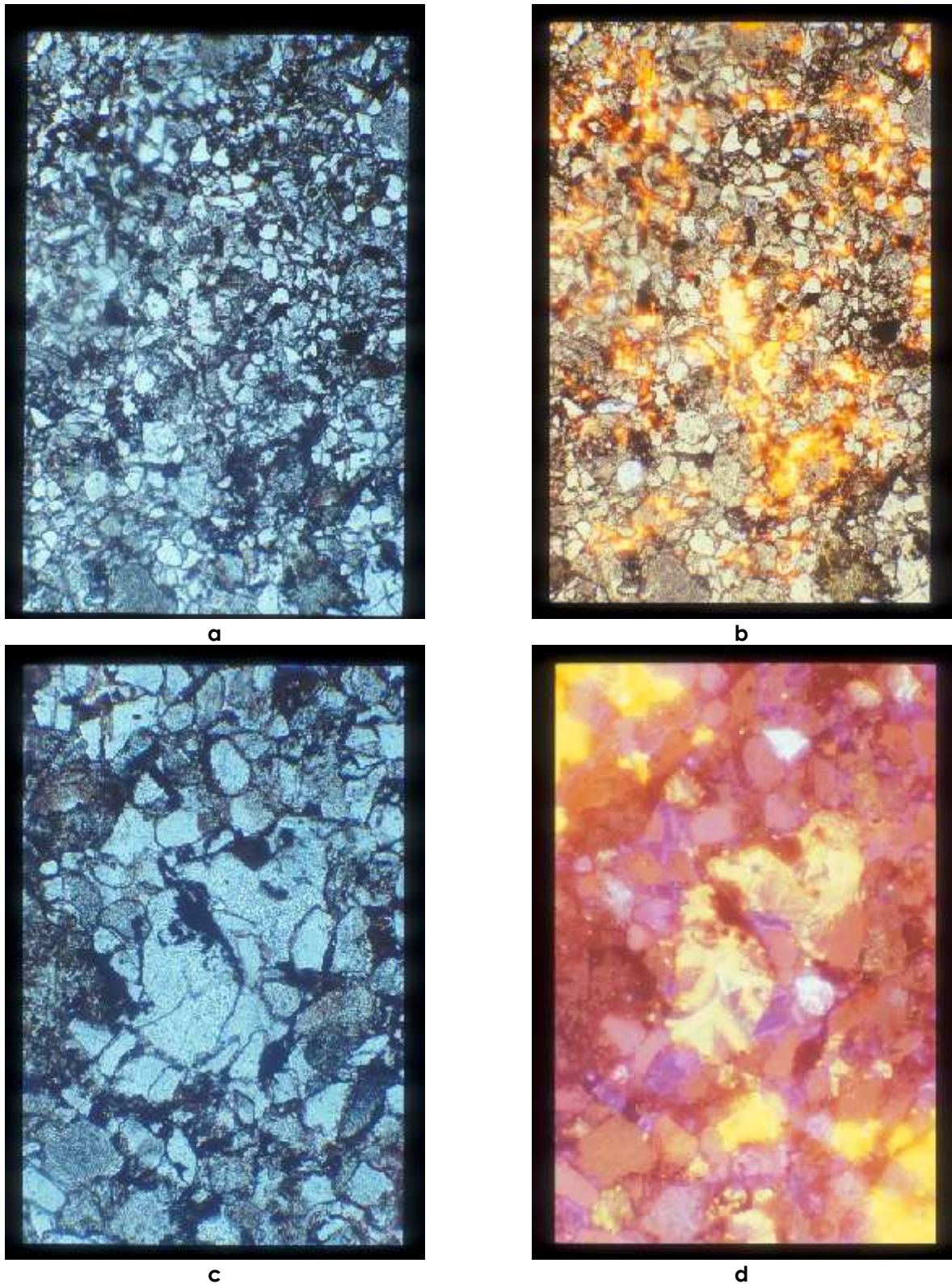


Figura 5.15:

a y b: Tambach en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. El abundante cemento de calcita es visible en color de CL amarillo-anaranjado brillante. Ancho de la foto 3 mm aprox.

c y d: Tambach en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. Los parches de calcita son visibles en color de CL amarillo-anaranjado brillante. El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible en colores de CL violetas alrededor de los granos de cuarzo en color de CL rojo. En blanco brillante se observan granos de microclina. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

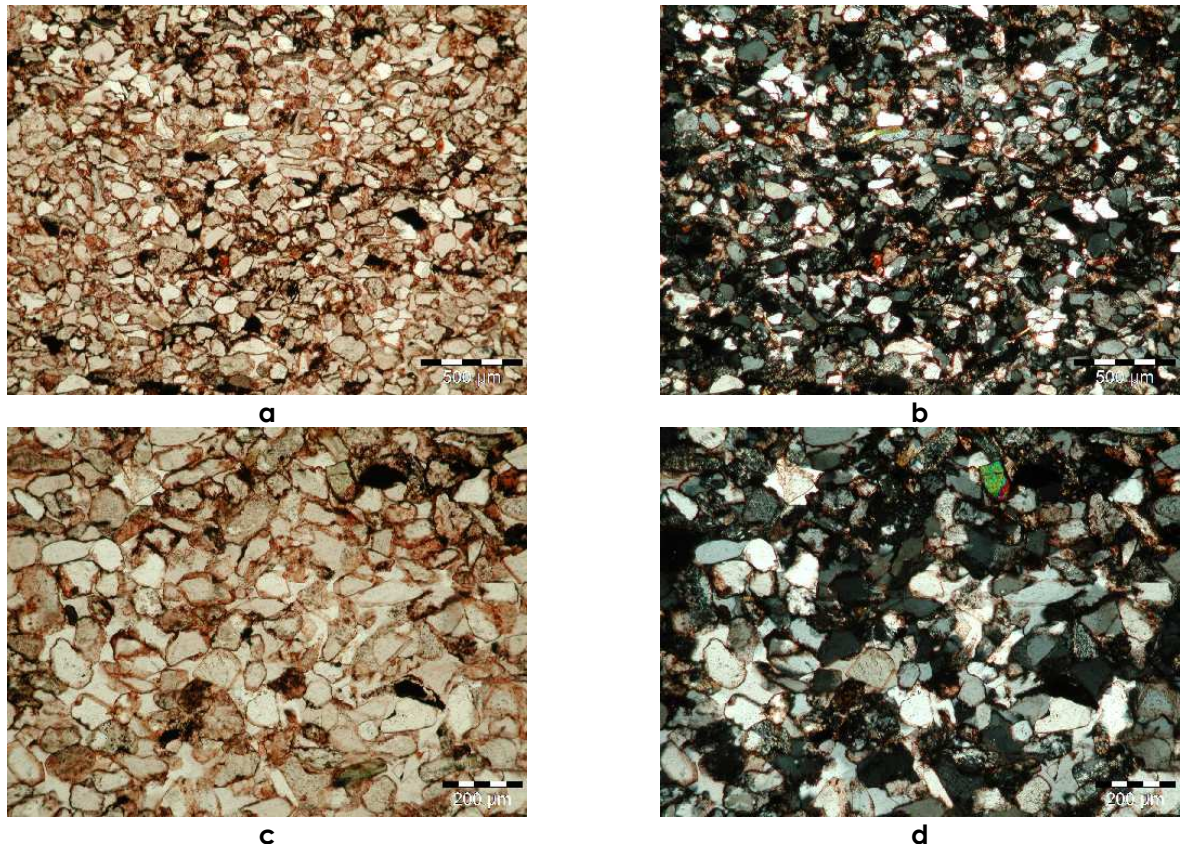


Figura 5.16:

a y b: Tambach en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Se observan granos de cuarzo con una pátina de hematita. Los granos prolados están orientados con su eje mayor paralelo a la estratificación.

c y d: Tambach en LPP y PC, respectivamente. La pátina de hematita permite ver la forma original de los granos de cuarzo que presentan abundante sobrecrecimiento sintaxial de sílice.

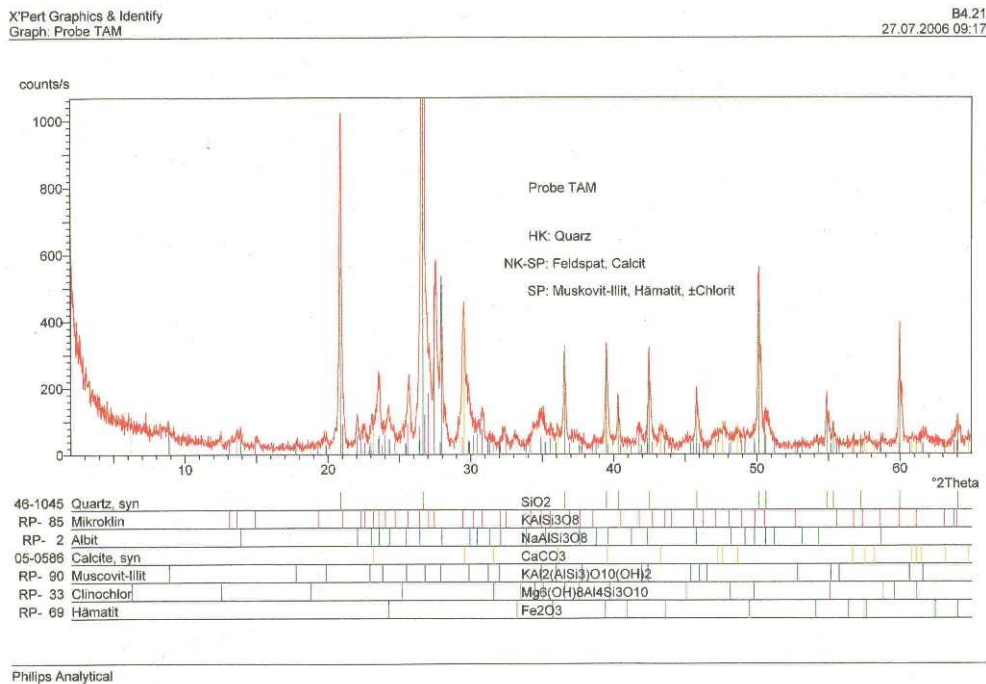


Figura 5.17: Difractograma de Tambach. Los minerales detectados son cuarzo, microclina, albita, calcita, muscovita-illita, clorita (clinocloro) y hematita.

g. Weser grau

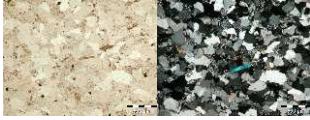


Lámina delgada 395 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 401 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 409 – perpendicular a la estratificación (CL)

La roca es una arcosa a subarcosa de grano grueso y color gris. El cemento consiste en sobrecrecimiento sintaxial de sílice y pátina de óxido de hierro. Los componentes detríticos son principalmente cuarzo y feldespato y en menor proporción fragmentos líticos. Los minerales accesorios presentes son muscovita, circón, turmalina, apatito, rutilo y minerales opacos.

El tamaño máximo de grano es de 800 micras, la mayoría de los granos tiene un tamaño entre ese valor y 340 micras. El tamaño de grano más fino es entre 60 y 160 micras, este valor corresponde a limo muy grueso y arena muy fina. La selección es moderada a buena.

Aproximadamente un 70% de los granos son de cuarzo, la mayoría de estos son monocristalinos (90%) y presentan extinción ondulosa. Están orientados con su eje mayor paralelo al plano de estratificación.

La proporción de feldespato en la roca es alrededor de 25% y está representada por ortoclasa, microclina y plagioclasa. La ortoclasa presenta el típico aspecto turbio y diminutos cristales de mica blanca, conocida como sericita, resultado de alteración.

Los fragmentos líticos no son más de un 2% y aparentemente son de origen volcánico.

Prácticamente toda la muscovita presente, alrededor del 1% de los granos, aparece con forma laminar, con una relación axial de hasta 15. Los minerales opacos representan alrededor del 1% de los granos de la roca. Los demás minerales accesorios no son más del 1% de la fracción detrítica de la roca. La turmalina presenta sobrecrecimiento autigénico, evidenciado principalmente debido a cambios en el color del pleocroísmo, siendo normalmente de transparente a verde y el sobrecrecimiento de transparente a azul.

El cemento es de dos tipos, el más común y desarrollado es el sobrecrecimiento sintaxial de sílice, que se hace visible cuando el otro cemento, una pátina de óxido de hierro, muestra la forma original de los granos.

Los granos son redondeados y muestran principalmente contactos suturados, pero también existen contactos cóncavo-convexos y en menor proporción contactos planares. Los granos son esféricos y prolados. La textura es grano soportada.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

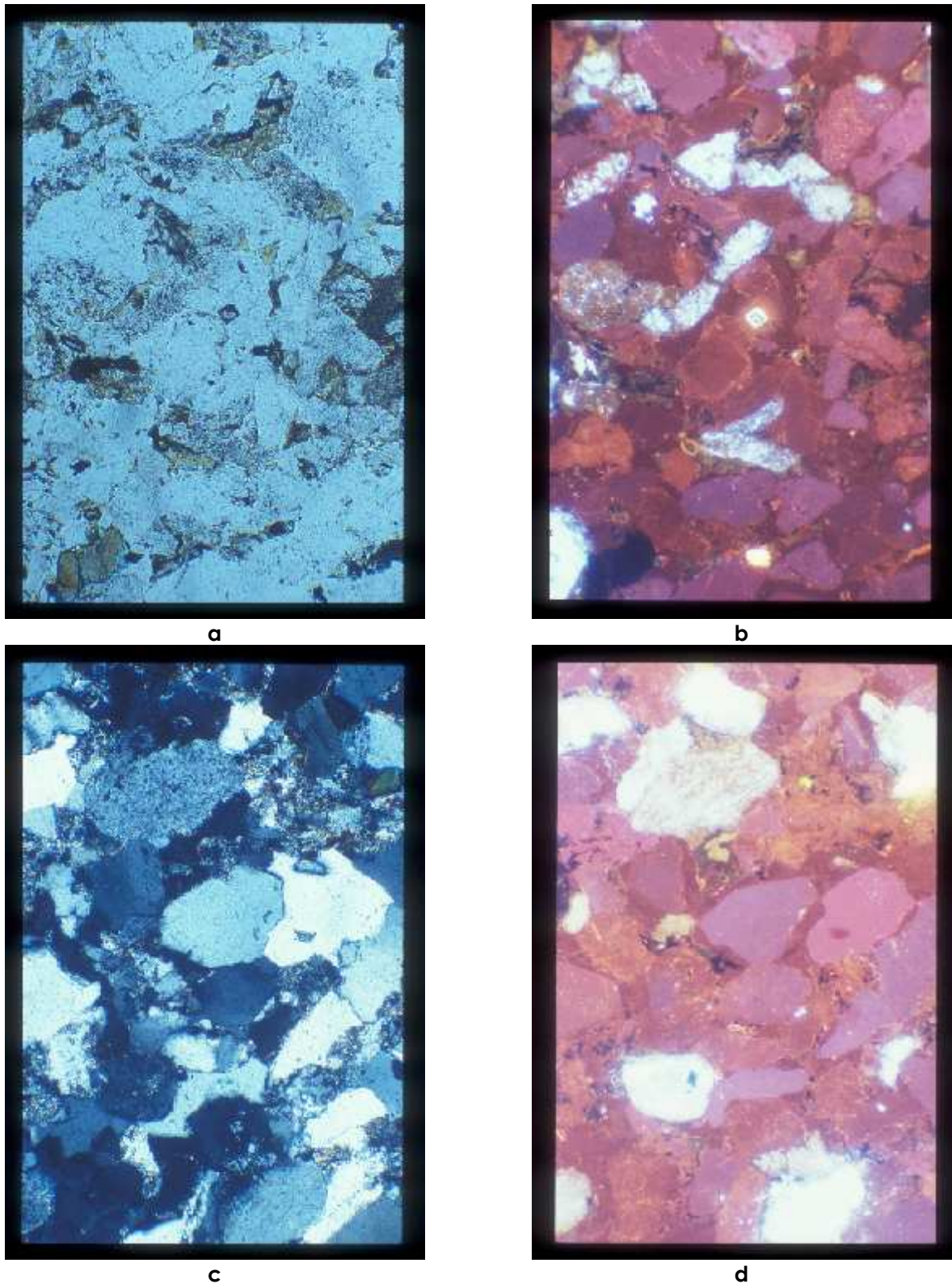


Figura 5.18:

a y b: Weser grau en LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. En color de CL rojo oscuro se visualiza el sobrecrecimiento sintaxial de sílice alrededor de los granos de cuarzo en rojos más claros. En color de CL azul brillante con puntos oscuros se ven los feldespatos alterados. En el centro de la foto se puede ver un grano de circón mostrando un halo. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

c y d: Weser grau en PC y mostrando colores de CL, respectivamente. Los contactos entre granos que eran originalmente puntuales y longitudinales (CL) se ven como saturados en PC. Obsérvese la alta proporción de granos de feldespato en CL (color azul brillante). Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

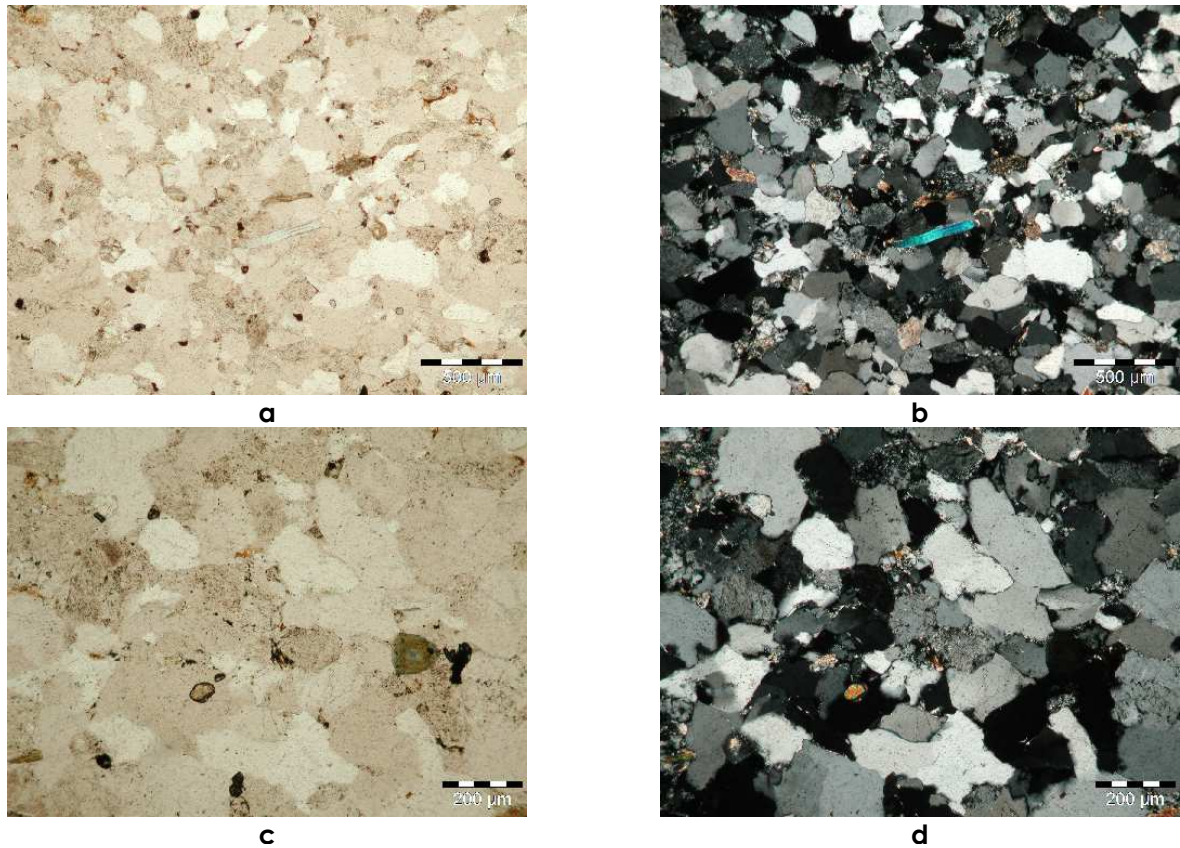


Figura 5.19:

a y b: Weser grau en LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Los granos de cuarzo aparecen como los principales componentes. Se observa un grano de muscovita en el centro de la foto.

c y d: Weser grau en LPP y PC, respectivamente. En el centro de la foto se observa un grano de feldespato, probablemente microclina. Un grano de circón se observa en el centro de la foto y a la derecha un grano de turmalina.

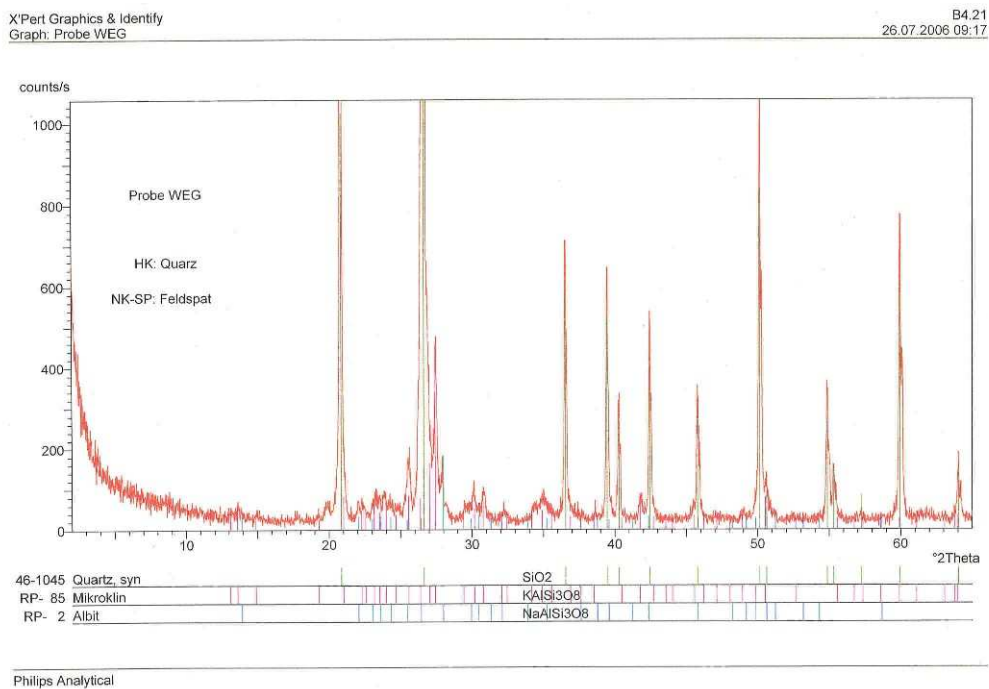


Figura 5.20: Difractograma de Weser grau. Los minerales detectados son cuarzo, microclina y albita.

h. Weser Rot

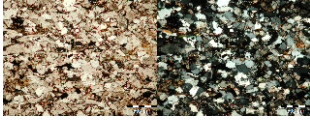


Lámina delgada 390 – paralela a la estratificación

Lámina delgada 396 – perpendicular a la estratificación

Lámina delgada 408 – perpendicular a la estratificación (CL)

Esta roca es una subarcosa de grano medio y color rojo. El cemento está compuesto por sobrecrecimiento sintaxial de sílice, pátina de óxido de hierro y parches de calcita. Los granos son de cuarzo, feldespato, muscovita y fragmentos líticos. Minerales opacos, circón y apatito son los principales minerales accesorios.

Los granos más grandes tienen un tamaño de hasta 440 micras, siendo un 90 a 95% de la fracción detrítica. Alrededor de 5 al 10% del esqueleto es representado por granos de aproximadamente 80 micras, esto corresponde a arena muy fina. La selección es considerada buena.

Los granos de cuarzo son alrededor del 85% de la fracción detrítica, siendo la mayoría de ellos monocristalinos y mostrando extinción ondulosa.

El feldespato es principalmente microclina pero también algunas plagioclasas aparecen. Representan de un 15 a un 20% de los granos.

Los fragmentos líticos son menos del 1% de los granos de la roca.

La muscovita es un 2% de la fracción detrítica y presenta una relación axial de hasta 25. Están orientadas paralelas al plano de estratificación y su eje mayor tiene un largo máximo de 1.1 milímetros.

Los minerales opacos no son más del 1% de la roca y pueden distinguirse de los parches de óxido de hierro porque son muy redondeados.

El circón y el apatito son muy redondeados y están presentes en menos del 1% de los minerales detríticos.

El principal cemento es un sobrecrecimiento sintaxial de sílice, en la mayoría de los casos visible porque otro tipo de cemento, una pátina de óxido de hierro (hematita) está presente mostrando la forma original de los granos. Parches de calcita y de óxido de hierro son comunes.

La textura de la arenisca es grano soportada. los granos son sub-redondeados a redondeados y sus contactos son principalmente cóncavo-convexos y en algunos casos planares. Su forma es esférica y prolada, con una relación axial de hasta tres.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

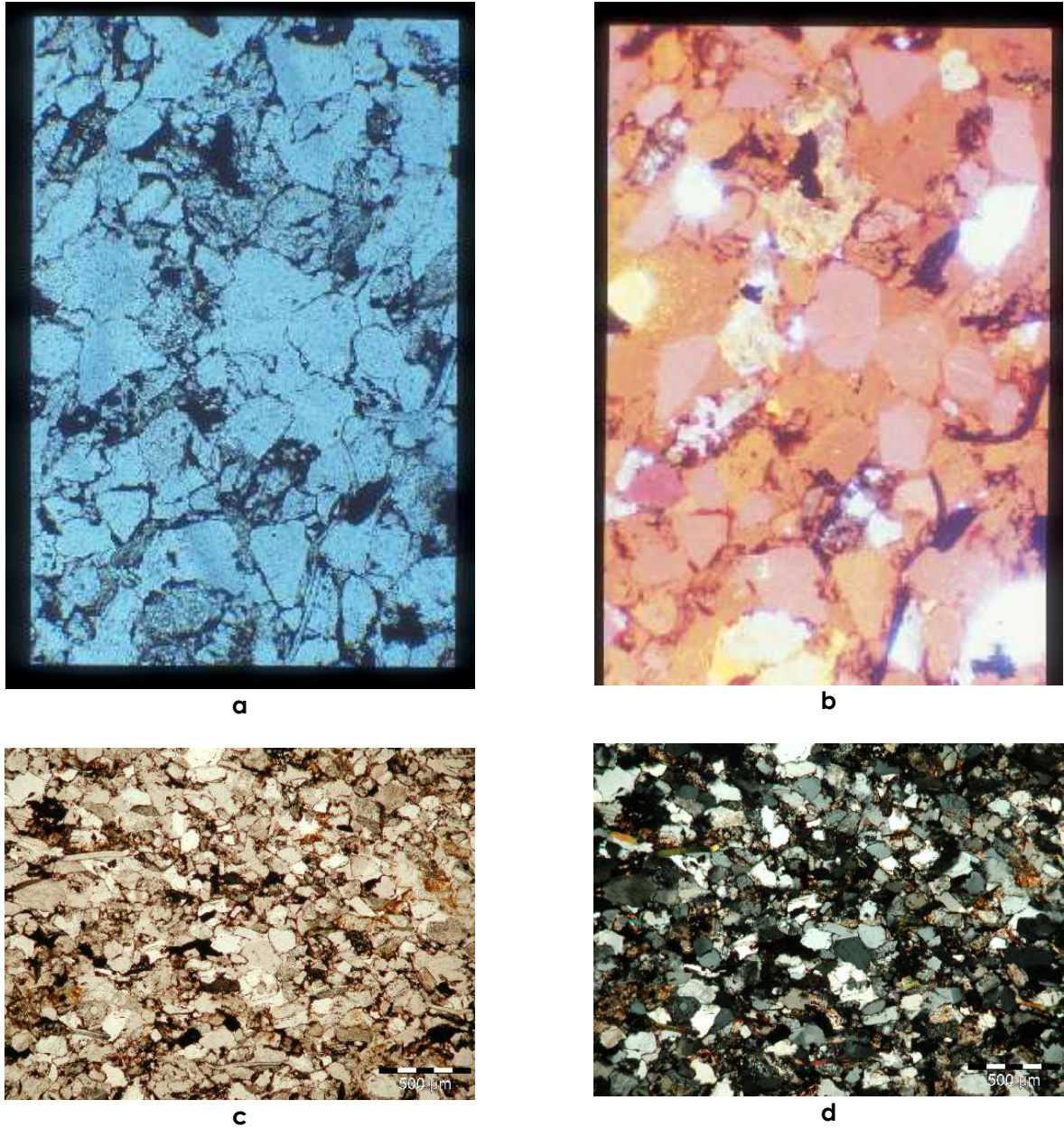


Figura 5.21:

a y b: Weser rot in LPP y mostrando colores de CL, respectivamente. En color de CL azul brillante se observan feldespatos. El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible en colores de CL rojos y anaranjados oscuros rodeando los granos de cuarzo en tonos más claros. El cemento de calcita se observa en colores de CL amarillos anaranjados brillantes. El grano de muscovita, visible en LPP en la esquina inferior derecha de la foto, no muestra luminiscencia, apareciendo en CL en color negro. Ancho de la foto 1.5 mm aprox.

c y d: Weser rot in LPP y PC, respectivamente. Vista general perpendicular a la estratificación. Los componentes principales son cuarzo, minerales opacos y muscovita.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

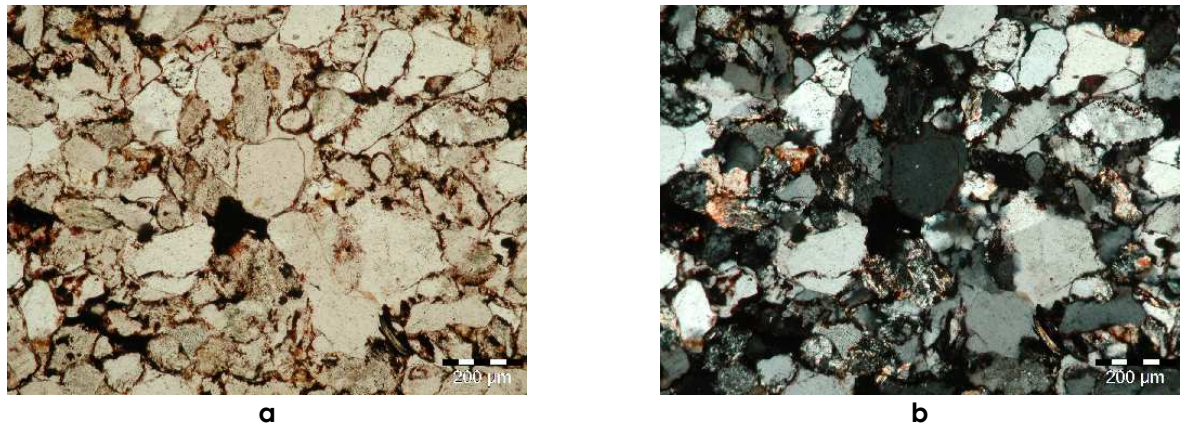


Figura 5.22:

a y b: Weser rot en LPP y PC, respectivamente. El sobrecrecimiento sintaxial de sílice es visible en el grano del centro de la foto en LPP, debido a que una pátina de hematita preserva la forma original del grano. Un pequeño parche de calcita se observa en la parte central izquierda de la foto en LP. Se observan varios minerales opacos diseminados en la roca.

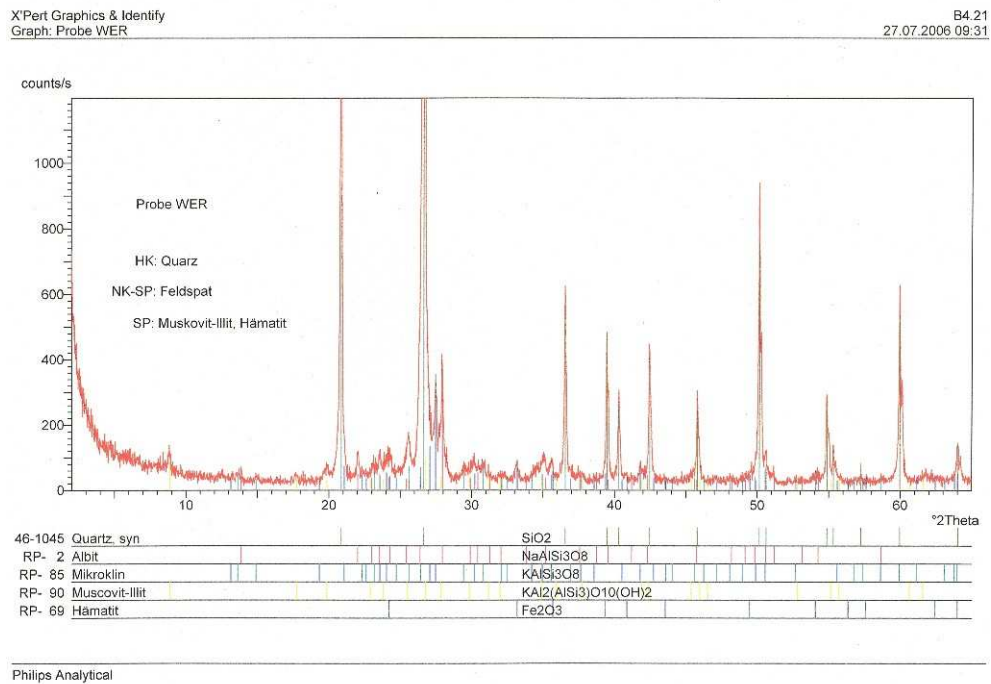


Figura 5.23: Difractograma de Weser rot. Los minerales detectados son cuarzo, albita, microclina, muscovita-illita y hematita.

6. Propiedades petrofísicas:

Las propiedades petrofísicas analizadas en esta investigación son: densidad, porosidad, distribución de tamaño de poros, permeabilidad y expansión higroscópica, junto a las propiedades mecánicas (Resistencia a la Compresión Uniaxial y Resistencia a la Tensión Indirecta) descritas en el capítulo 7.

6.1. Densidad

Densidad (ρ) es el cociente entre la masa (m) y el volumen (V):

$$\rho = m/V \quad (2)$$

La unidad en el Sistema Internacional es kg/m^3 , en esta investigación se utilizará una unidad equivalente: g/cm^3 .

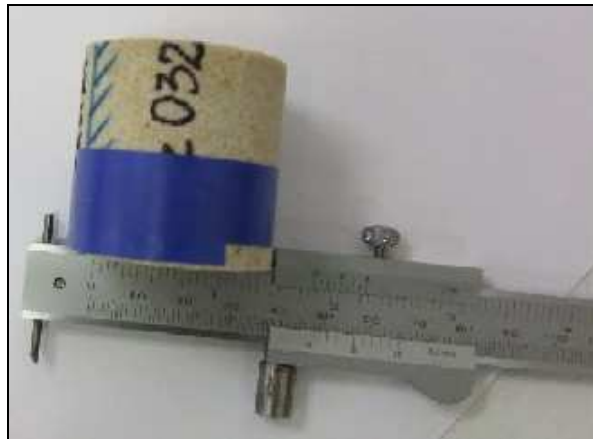


Figura 6.1: Medición del diámetro con una regla de alta precisión.

Los valores de densidad para cada uno de los especímenes de areniscas han sido calculados utilizando la correspondiente masa y volumen.

Las masas de las muestras han sido medidas en una balanza con precisión de centigramos y la longitud y diámetro utilizando una regla de precisión, con precisión de diez micras 10^{-5} m (Figura 6.1).

Los valores obtenidos para todas las areniscas se presentan en la Tabla 6.1.

Areniscas	Especímenes	Valor promedio	Mediana	Mínima	Máxima	Varianza
Ba	90	2,02	2,01	1,98	2,05	0,0002
Be	84	2,40	2,40	2,35	2,42	0,0001
Ob	84	2,01	1,99	1,93	2,13	0,0031
Sa	90	2,27	2,27	2,25	2,30	0,0001
Sc	84	2,30	2,31	2,27	2,35	0,0003
Ta	90	2,49	2,50	2,38	2,55	0,0009
Wg	56	2,38	2,38	2,32	2,50	0,0007
Wr	56	2,46	2,46	2,42	2,52	0,0003

Tabla 6.1: Parámetros estadísticos de **Densidad** para todas las areniscas, unidad: g/cm^3 .

Las densidades de las areniscas estudiadas varían entre 2.01 (Obernkirchen) a 2.49 g/cm³ (Tambach).

La variación de la densidad en cada tipo de arenisca es muy baja, alrededor del 1%, pero en el caso de Obernkirchen, la dispersión es de casi el 3%.

6.2. Porosidad y distribución de tamaños de poros

La porosidad (P) es una medida de la proporción de poros o espacios vacíos (V_P) en el volumen total (V_T) del material sólido. Los poros son de diferentes tamaños y formas y pueden estar cerrados o abiertos e interconectados. La porosidad se clasifica en primaria y secundaria, siendo la primera adquirida durante la formación de la roca y la segunda producto de la disolución de minerales detríticos, autigénicos y/o fósiles (modificada de Schmidt, McDonald y Platt, 1977 y Choquette y Pray, 1970, según Scholle, 1979). La porosidad efectiva (P_{ef}) representa la proporción de poros que están interconectados.

$$P = V_P / V_T \quad (2)$$

En esta investigación la porosidad es determinada utilizando agua y por lo tanto la porosidad efectiva está siendo medida, ya que el agua que se hace intruir solo puede ocupar poros que están interconectados. Al no realizarse, en las areniscas estudiadas, una impregnación previa a la realización de las láminas delgadas, no se pudo establecer las características y proporciones de las porosidades primaria y secundaria.

La porosidad es calculada utilizando los "Suggested Methods for Determining Water Content" propuesta por el ISRM (International Society for Rocks Mechanics). Consiste en primer lugar, en restar la masa de un espécimen saturado en agua (m_{sat}) menos la masa del mismo espécimen en un estado seco (m_{seco}). El valor obtenido es la masa de agua necesaria para llenar todos los espacios de poros interconectados. Siendo la densidad del agua 1g/cm³, el volumen de agua es calculado fácilmente y dicho volumen es el volumen de los espacios de poros. Entonces, dado que se conoce el volumen del espécimen, la porosidad se calcula utilizando **(3)**.

$$P_{ef} = [(m_{sat} - m_{seco})] / V_T \quad (3)$$

Los valores obtenidos para todas las areniscas se presentan en la Tabla 6.2.

La distribución de los tamaños de los poros es medida aplicando la Técnica de Porosimetría de Intrusión de Mercurio. El procedimiento consiste en situar una pequeña muestra en una celda donde se genera vacío. La celda es llenada con mercurio y su volumen total es registrado por una computadora.

Luego se aplica una presión controlada y el mercurio se ve forzado a intruir en los poros de la muestra. La computadora registra el volumen de mercurio que es intruído para cada valor de presión. El volumen de mercurio que intruye corresponde al volumen de poros y la distribución de los tamaños de los poros es calculada utilizando la presión aplicada ya que esta es inversamente proporcional al tamaño de los poros.

Areniscas	Especímenes	Valor promedio	Mediana	Mínima	Máxima	Varianza
Ba	90	23,60	23,41	21,59	27,05	1,29
Be	84	9,54	9,66	6,79	10,87	0,51
Ob	84	23,81	24,80	18,36	26,72	5,12
Sa	90	14,86	14,84	13,74	16,56	0,47
Sc	84	13,57	13,54	11,80	15,62	0,84
Ta	72	6,04	5,91	3,58	11,89	1,86
Wg	56	9,02	8,93	7,84	10,44	0,41
Wr	56	6,31	6,38	3,86	9,21	1,08

Tabla 6.2: Parámetros estadísticos de **Porosidad** para todas las areniscas, unidad: porcentaje.

Los poros se clasifican por su tamaño en (IUPAC, 2001):

- a. Macroporos: más grandes de 50 nm.
- b. Mesoporos: entre 2 nm y 50 nm.
- c. Microporos: menores de 2 nm.

Los datos obtenidos consisten en histogramas en los que el tamaño de los poros es mostrado en función del porcentaje de la porosidad (Figura 6.2).

Los valores de la porosidad varían de 6.04 a 23.81%. Los datos obtenidos muestran que la porosidad está relacionada a la distribución del tamaño de poros, teniendo las areniscas más porosas la mayor proporción de poros grandes, dividiéndose cuatro grupos teniendo en cuenta estos parámetros:

a. Las areniscas más porosas, Bad Bentheim y Obernkirchen, tienen una gran cantidad de macroporos (casi 55% de porosidad) cuyos tamaños varían de 10 a 46 micras y 8.2 a 28 micras, respectivamente.

b. Areniscas con porosidad media, Schleeriether y Sander, muestran una distribución de tamaño de poros bimodal, cuyos valores varían entre 0.0046 y 4.6 micras. Los dos máximos en los histogramas son pequeños, el primero en los valores de mesoporos (de 0.028 a 0.064 micras y 0.046 a 0.064 micras, respectivamente), representando no más del 14% de porosidad. El otro máximo es en los macroporos (0.64 a 1 micras y 0.84 a 2.8 micras, respectivamente).

c. Bebertal y Weser grau tienen baja porosidad y la distribución de tamaños de poros tiene un máximo que representa no más del 25% de porosidad, en los valores de macroporos, 1 a 2.8 micras y 1 a 4.6 micras, respectivamente.

d. Las variedades menos porosas, Tambach y Weser rot, tienen solamente poros con un tamaño de entre 0.0046 a 1 micras. Ambas variedades de areniscas muestran un máximo en el tamaño de los macroporos (en el rango de 0.1 a 0.46 micras y 0.46 a 0.82 micras, respectivamente) y estos máximos representan alrededor de 50% de porosidad.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

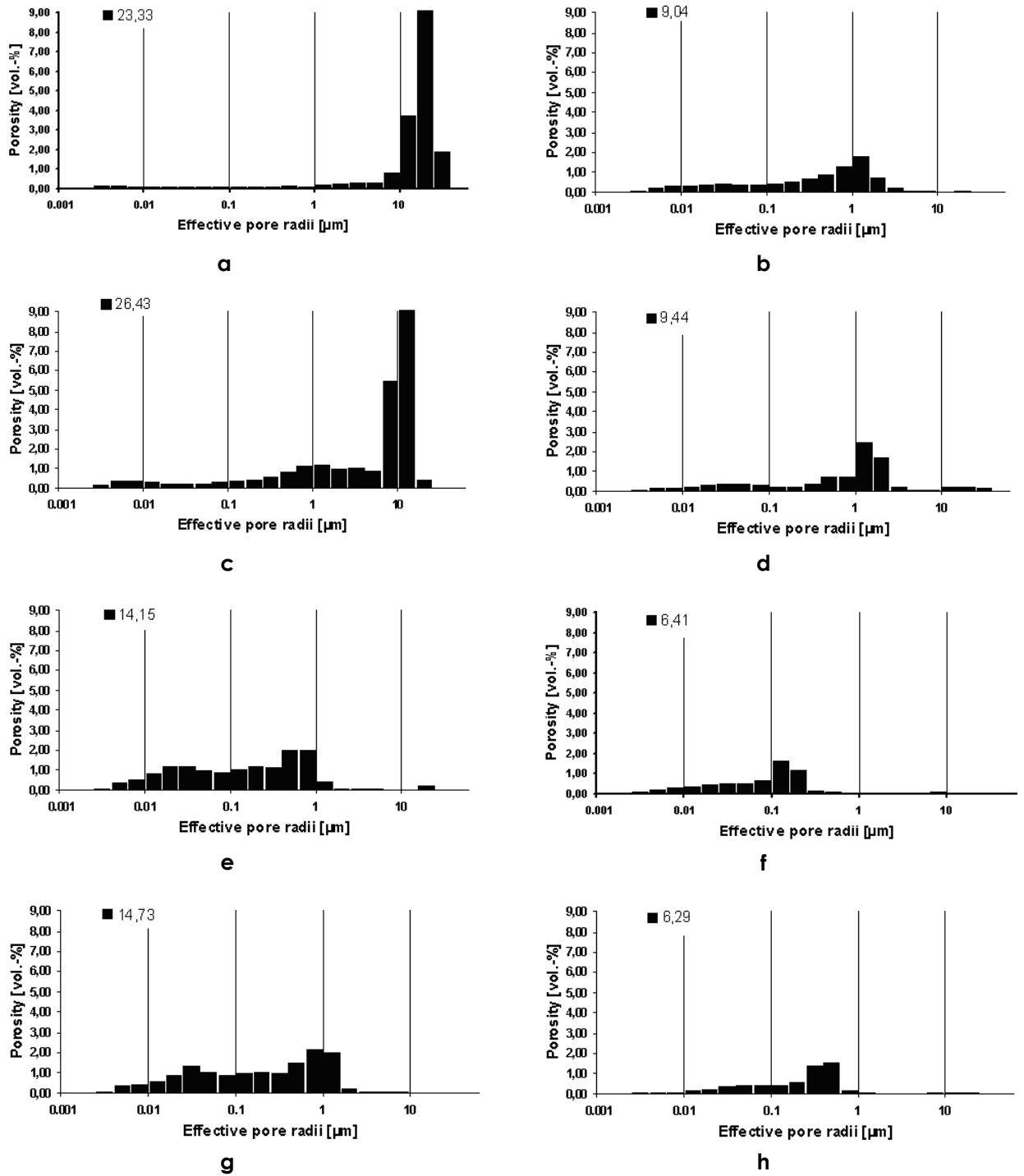


Figura 6.2: Histogramas de Porosimetría de: Bad Bentheim (a), Bebertal (b), Obernkirchen (c), Weser grau (d), Schleeriether (e), Tambach (f), Sander (g) y Weser rot (h).

6.3. Permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad fueron realizados en los laboratorios Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, usando la norma EN 993-4 (Versión alemana, Abril 1995).

El principio utilizado en la determinación de esta propiedad es la Ley de Darcy **(4)**, que relaciona la permeabilidad **(k)** de un material poroso con la viscosidad de un fluido **(n)** que está circulando por él, su velocidad **(V)** y la presión hidráulica **(i)** (o gradiente hidráulico como es conocido en hidrogeología) entre la entrada y la salida del sistema.

$$k = - nV/i \quad (4)$$

La permeabilidad es determinada usando un simple instrumento. Este consiste en una celda donde la muestra es localizada, que posee dos conexiones: una es la fuente del fluido que es inyectado (en esta investigación se utiliza nitrógeno) y la otra es la salida por donde el gas es evacuado. Las presiones y la tasa de flujo es registrada por una computadora que calcula la permeabilidad de la muestra (ver figuras 6.3 y 6.4).

Areniscas	Muestras	Valor promedio	Mediana	Mínima	Máxima	Varianza
Ba k _H	12	2951	2961	2832	3061	4341
Ba k _V	19	2622	2616	2498	2755	5091
Be k _H	12	1,58	1,60	1,37	1,84	0,0190
Be k _V	24	0,69	0,65	0,10	1,07	0,0402
Ob k _H	12	72,5	61,0	10,6	179,5	2908
Ob k _V	24	125	151	9,63	222,5	4985
Sa k _H	12	0,92	1,05	0,16	1,19	0,0893
Sa k _V	24	0,44	0,45	0,25	0,67	0,0092
Sc k _H	12	0,54	0,42	0,29	1,14	0,0910
Sc k _V	24	0,33	0,29	0,07	0,74	0,0417
Ta k _H	6	0,05	0,03	0,01	0,16	0,0036
Ta k _V	12	0,04	0,02	0,01	0,19	0,0029
Wg k _H	4	1,07	1,07	1,04	1,12	0,0012
Wg k _V	4	0,66	0,68	0,56	0,74	0,0064
Wr k _H	4	0,19	0,19	0,17	0,20	0,0004
Wr k _V	4	0,16	0,16	0,14	0,18	0,0002

Tabla 6.3: Parámetros estadísticos de **Permeabilidad** (en mD) para todas las areniscas.

Las dimensiones de todos los especímenes utilizados son 40 mm de largo y diámetro. Dos direcciones fueron analizadas, una paralela a la estratificación y otra perpendicular a esta. Como los valores de permeabilidad obtenidos para todas las areniscas, independientemente de si son altos o bajos, son diferentes en las dos direcciones consideradas es útil definir permeabilidad direccional (Tiab y Donaldson, 2004), siendo la permeabilidad paralela a la estratificación la permeabilidad horizontal (k_H) y la perpendicular a la estratificación la vertical (k_V).

Los valores obtenidos para todas las areniscas, para las dos direcciones se detallan en la tabla 6.3.



Figura 6.3: Efectuando un ensayo de Permeabilidad.



Figura 6.4: Máquina para ensayos de Permeabilidad.

Los datos obtenidos muestran que hay una gran variación en los valores de permeabilidad. La mayoría de las areniscas poseen valores muy bajos, hasta 1.58 mD, con la excepción de dos areniscas: Bad Bentheim, que es la más permeable, con una permeabilidad horizontal (k_H) de casi 3000 mD y Obernkirchen con una k_H de 72.5 mD. La arenisca menos permeable es Tambach, con una k_H de 0.05 mD.

Todas las areniscas tienen un mayor k_H que k_V a excepción de Obernkirchen, que posee una k_V de 125.5 mD y una k_H de 72.5 mD. No se conoce una explicación para este comportamiento.

6.4. Expansión Higroscópica

La expansión higroscópica es una propiedad de los materiales de hincharse en contacto con el agua. Depende principalmente del contenido de arcillas expansivas y la proporción de microporos presentes en la roca.

El método utilizado para medir esta propiedad consiste en localizar la muestra en una celda a temperatura constante dentro de un contenedor. Sobre la muestra se coloca un transductor lineal de desplazamiento y entre estos una pieza cilíndrica de vidrio que aísla el transductor de la muestra para evitar su contacto con agua. Una computadora registra todos los datos recibidos desde el transductor. Cuando la muestra se coloca correctamente la computadora registra el valor inicial, luego se coloca agua en el

contenedor hasta que alcanza el tope de la muestra. La computadora registra cada cinco segundos los datos transmitidos desde el transductor, hasta que el valor es estacionario. El resultado es una tabla de expansión versus tiempo.

Cuatro muestras cilíndricas de cada una de las ocho areniscas estudiadas son preparadas con un largo de 50 mm y un diámetro de 40 mm, dos de las muestras con la estratificación paralela al largo y dos con la estratificación perpendicular al largo.

Los resultados para cada arenisca se muestran en la tabla 6.4.

Arenisca	Paralela a la estratificación		Perpendicular a la estratificación	
	Expansión (mm)	Deformación	Expansión (mm)	Deformación
Ba	0,0025	0,05	0,00215	0,043
Be	0,02	0,4	0,0175	0,35
Ob	0,008	0,16	0,005	0,1
Sa	0,0295	0,59	0,011	0,22
Sc	0,0415	0,83	0,028	0,56
Ta	0,0944	1,85	0,0105	0,21
Wg	0,007	0,14	0,0035	0,07
Wr	0,017	0,34	0,0065	0,13

Tabla 6.4: Propiedades de expansión higroscópica.

Los resultados muestran que los valores de expansión higroscópica son mayores en la dirección perpendicular a la estratificación que en la dirección paralela a esta, este comportamiento sugiere que las arcillas expansivas están orientadas con sus ejes mayores paralelos a la estratificación. Las areniscas que poseen los valores más altos son Tambach, Schleeriether, Sander y Bebertal. Tres areniscas poseen valores intermedios: Weser grau, Weser rot y Obernkirchen. Bad Bentheim posee valores muy bajos de expansión higroscópica.

6.5. Ensayos Mecánicos

Los ensayos mecánicos fueron realizados en laboratorios Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, utilizando una Máquina Servo-hidráulica de Ensayos clase 1 (ver Figura 5.5) que aplica una fuerza máxima en dos rampas calibradas de 1.500 y 300 kN, respectivamente, con una tasa de esfuerzo de 10^{-5} seg⁻¹. La exactitud de la medida es mejor al 1% del valor medido.

Para cada arenisca, fueron preparados grupos de seis especímenes con diferente contenido de humedad relativo al máximo posible: 0% (completamente secos), 5%, 10%, 20%, 50% y 100% (completamente saturados).

Metodología para la obtención de saturaciones parciales de agua

La metodología para alcanzar las diferentes saturaciones de agua fue desarrollada buscando asegurar una rápida preparación de las muestras para proceder a realizar los ensayos mecánicos. Para este fin fueron considerados los "Métodos sugeridos para la saturación progresiva de muestras de rocas" (US Army Rock Testing Handbook, 1995) del Ejército de EEUU, pero finalmente no fueron utilizados debido al prolongado tiempo requerido para lograr la saturación completa de las muestras.



Figura 6.5: Máquina de Ensayos Mecánicos.



Figura 6.6: Saturación de las muestras.



Figura 6.7: Secado de las muestras.

La cantidad de agua requerida para alcanzar las diferentes saturaciones parciales de agua es calculada usando la porosidad de cada espécimen. El estado seco es logrado secando los especímenes en un horno a 70°C por dos días o más (ver figura 6.7), hasta que el espécimen no muestre más cambios en su masa, significando que no hay más pérdida de agua. El estado completamente saturado es alcanzado usando una campana de

vacío (ver figura 6.6), hasta que no se detecta más pérdida de aire, significando que el agua intruyó en todos los poros interconectados del cuerpo del espécimen.

Para alcanzar los diferentes contenidos de agua luego de conocer la porosidad del espécimen, se realizan algunos cálculos. Las diferentes masas para los correspondientes contenidos de agua son calculados y los especímenes son secados en un horno a 70°C hasta que alcanzan estos valores de masa.



Figura 6.8: Especímenes empacados en papel plástico.

Luego los especímenes son envueltos en papel plástico para mantener el porcentaje de saturación y para asegurara que el agua se distribuya homogéneamente en toda la muestra (ver figura 6.8). Luego de algunos días los ensayos mecánicos pueden ser realizados.

a. Resistencia a la Tensión Indirecta (Ensayo Brasil)

El ensayo Brasil fue desarrollado por Carneiro (1953) para medir la resistencia a la tensión indirecta. El ensayo consiste en aplicar una fuerza en una muestra cilíndrica (como se observa en la figuras 6.9 y 6.10) de modo de evaluar la resistencia a la tensión indirecta.

Un total de 48 especímenes fueron medidos, usando muestras cilíndricas con una dimensión de 40 mm de largo y 40 mm de diámetro. Las areniscas analizadas son Bad Bentheim, Obernkirchen y Bebertal y tres direcciones fueron estudiadas, dos perpendiculares a la estratificación y una paralela a esta (ver figura 6.9).

Los resultados pueden verse en el Anexo I como gráficos de resistencia versus contenido de agua.

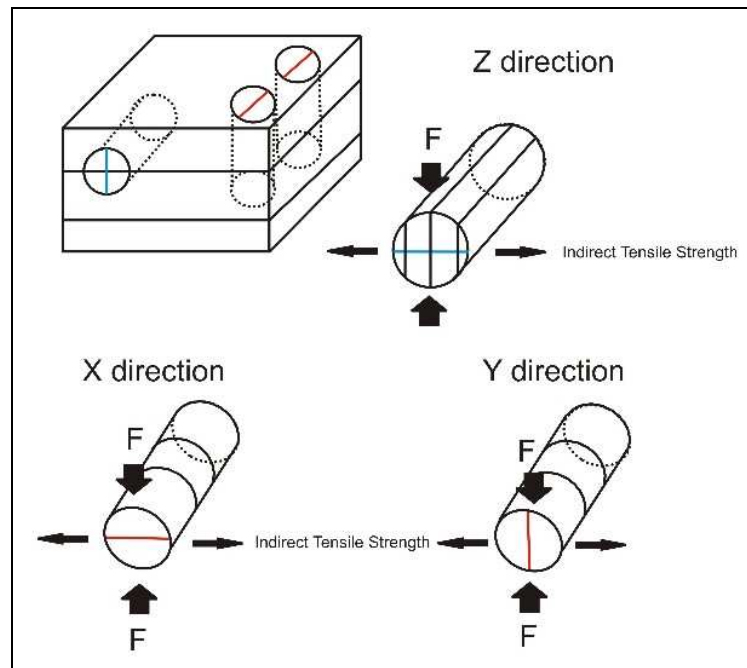


Figura 6.9: Dirección del esfuerzo aplicado en Ensayos Brasil (las líneas paralelas representan la estratificación).



Figura 6.10: Muestra luego del ensayo Brasil.



Figura 6.11: Muestra luego del ensayo UCS.

b. Resistencia a la Compresión Uniaxial (Ensayo UCS)

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial (UCS por su sigla en inglés) es el ensayo mecánico común que se realiza para analizar la resistencia a los esfuerzos de compresión de las rocas y otros materiales sólidos. Consiste en aplicar una fuerza a una tasa de esfuerzo constante, en una muestra cilíndrica, hasta que se rompe (ver figuras 6.11 y 6.14). El esfuerzo máximo que la muestra resiste sin romperse es su UCS o resistencia a la compresión uniaxial.

Un total de 534 especímenes fueron medidos, 150 usando una dimensión de muestra de 25 mm de diámetro y 40 de largo (identificado como UCS 1; ver figura 6.12) y 384 usando muestras cilíndricas con una dimensión de 25 mm

de diámetro y 50 mm de largo (identificadas en esta investigación como UCS 3; ver figura 6.13), como lo recomienda la ISRM. Las caras de los especímenes son planas y paralelas, esto se logra puliéndolos luego de cortados.

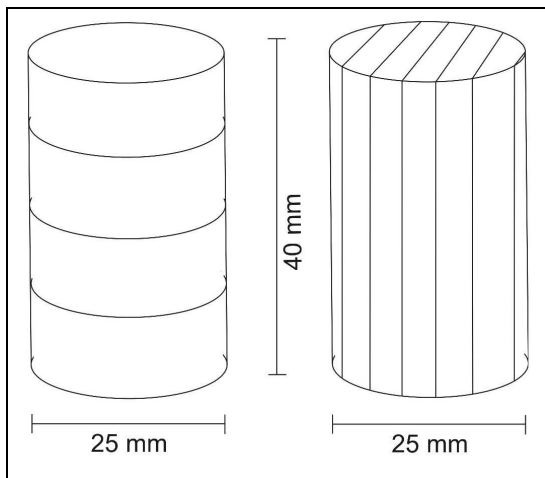


Figura 6.12: Muestras usadas en los Ensayos UCS 1 (las líneas paralelas representan la estratificación).

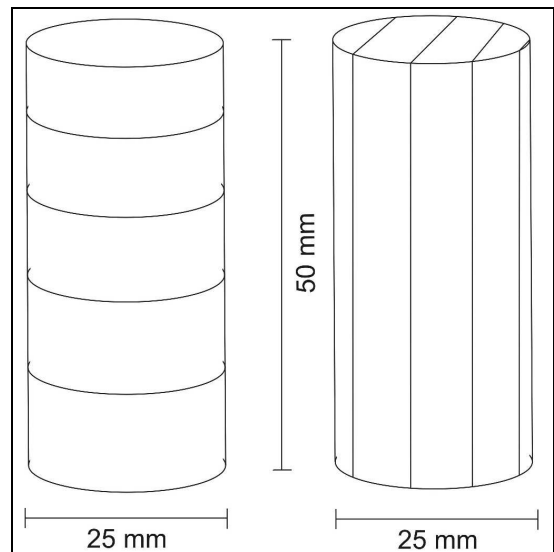


Figura 6.13: Muestras usadas en los Ensayos UCS 3 (las líneas paralelas representan la estratificación).

Los resultados obtenidos son ploteados en gráficos de UCS versus porcentaje de agua. La resistencia es expresada en valores absolutos, usando la unidad en el Sistema Internacional mega-pascal (MPa); y en valores relativos, como porcentaje de la máxima resistencia registrada para cada arenisca. Los gráficos pueden observarse en el Anexo I.

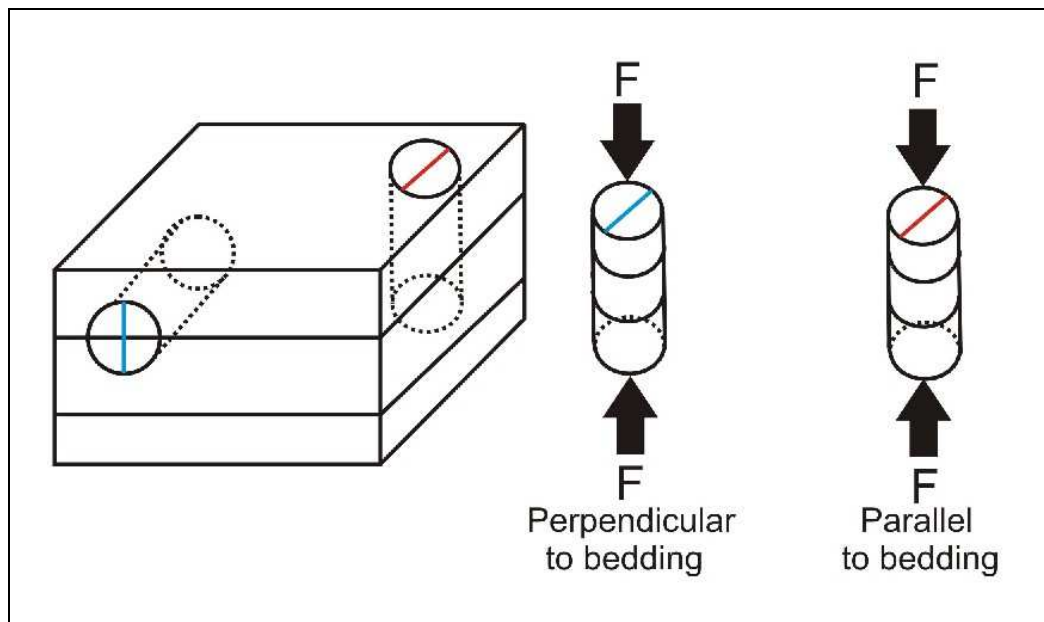


Figura 6.14: Dirección del esfuerzo aplicado en los Ensayos UCS (las líneas paralelas representan la estratificación).

7. Discusión de las relaciones entre las propiedades petrofísicas.

7.1. Densidad y Porosidad

En los gráficos de porosidad versus densidad (figuras 7.1 y 7.2) una correlación lineal negativa se puede observar entre estas dos propiedades, a mayor porosidad menor densidad, estos es lo que se espera ya que la masa de los espacios de poros, ocupada por aire, es cercana a cero.

$$P_{ef} = 100,301 - 37,903 * \rho + eps \quad (5)$$

En la figura 7.1 la curva (5) describe la relación entre estas dos propiedades, P_{ef} es la porosidad efectiva y ρ es la densidad. Esta muestra que a 0% porosidad, esto es la roca sin poros, la densidad es casi 2,65 g/cm³. Esto es la densidad del cuarzo, el principal constituyente de todas las areniscas estudiadas. La extrapolación de la densidad a cero corresponde a casi 100% porosidad, de acuerdo con lo que se puede esperar de materiales que están compuestos por una mezcla de dos componentes (poros y fases sólidas).

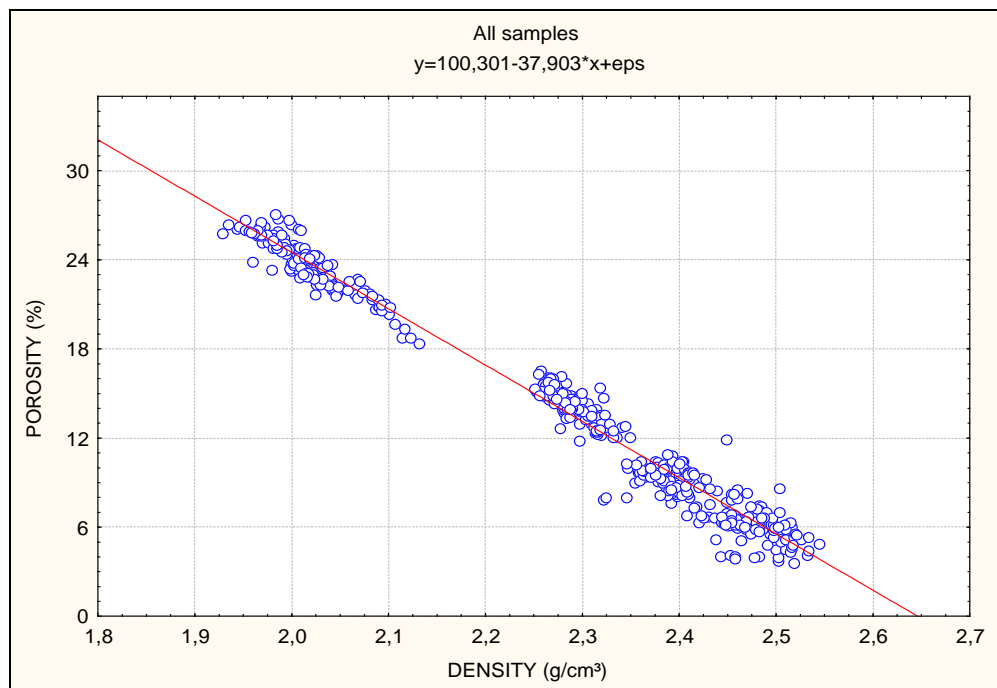


Figura 7.1: Porosidad versus Densidad, considerando todas las areniscas en conjunto.

En la figura 7.2 las similitudes entre las areniscas se hacen visibles. Cuatro grupos con densidades y porosidades similares pueden ser separados. Aquellas con alta porosidad y baja densidad se agrupan juntos, Bad Bentheim y Obernkirchen, teniendo la última la mayor dispersión en los valores. Schleeriether y Sander se agrupan juntas con valores intermedios de densidad y porosidad, la última siendo un poco más porosa considerando su valor promedio. Weser grau y Bebertal tienen valores similares de porosidad y alta densidad y Weser rot y Tambach componen el cuarto grupo, ambas

con valores muy altos de densidad y muy baja porosidad, teniendo la última la densidad más alta de todas las areniscas estudiadas.

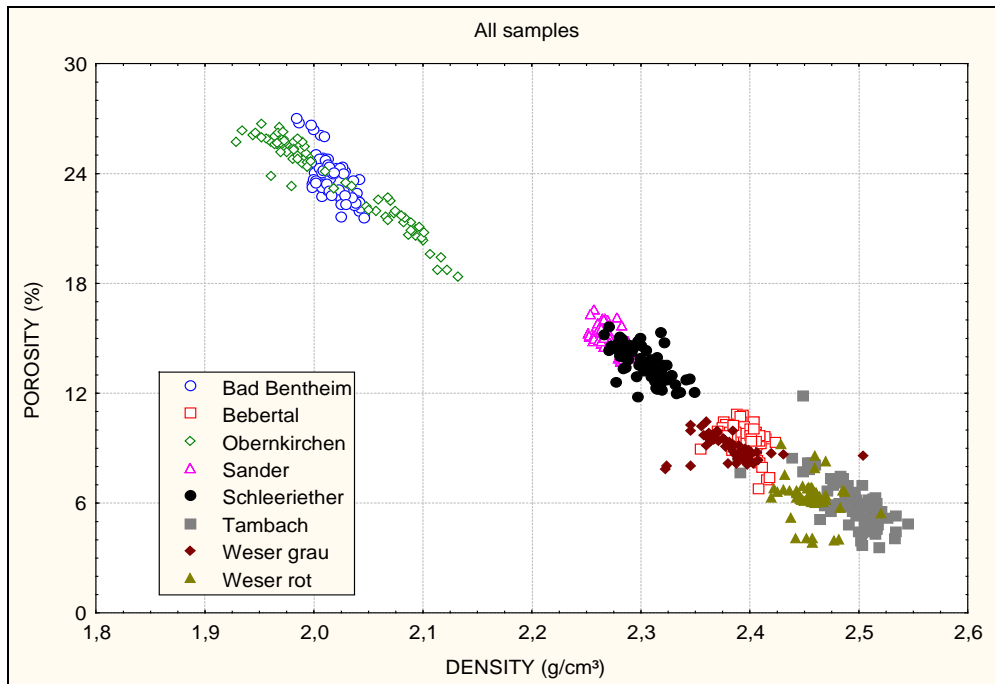


Figura 7.2: Porosidad versus Densidad, considerando todas las areniscas por separado.

7.2. Porosidad y Permeabilidad

La permeabilidad horizontal (k_H , que es la permeabilidad paralela al plano de estratificación) es analizada aquí porque tiene, en general, los valores más altos, como puede observarse en los gráficos en el Anexo II y en las figuras 7.3 a la 7.5.

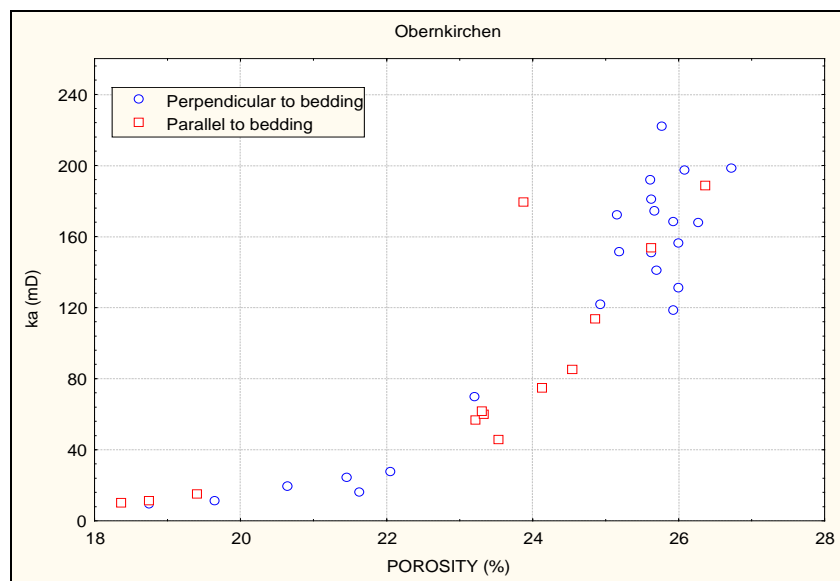


Figura 7.3: Permeabilidad versus Porosidad en Obernkirchen.

En general no se observa correlación entre estas dos propiedades cuando se analiza cada arenisca por separado, sin embargo, existen casos donde se puede observar alguna relación.

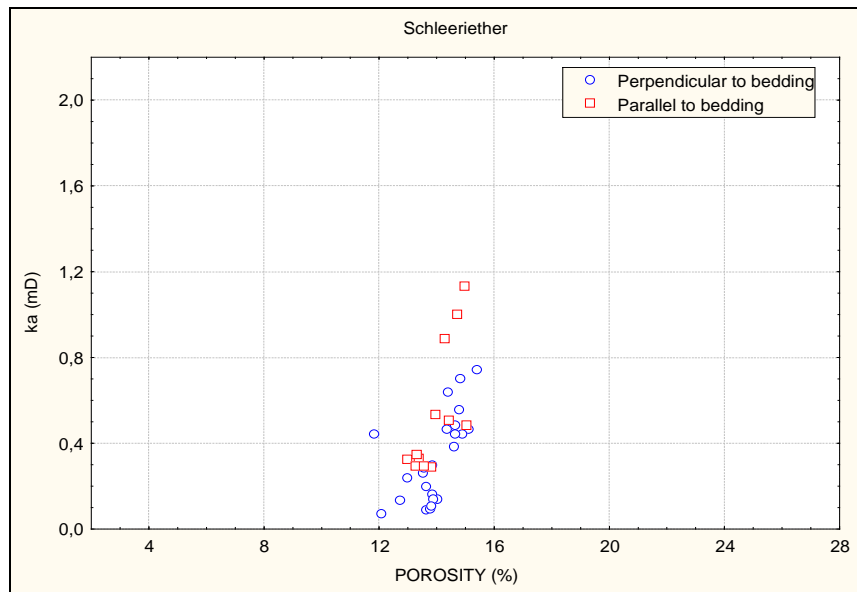


Figura 7.4: Permeabilidad versus Porosidad en Schleeriether.

En el caso de Obernkirchen se puede observar una correlación exponencial positiva, en el rango de porosidad de 18 a 26% y de permeabilidad horizontal de 10 a 220 mD (ver figura 7.3). Se infiere que esto puede deberse a que las muestras más porosas tengan mayor proporción de macroporos, lo que podría estar provocando una mayor permeabilidad de estos especímenes, aunque no existe evidencia experimental que sustente esta suposición, ya que el tamaño de poros fue determinado para un único espécimen. Es interesante observar que la k_H y la k_V tienen valores similares, aunque el valor promedio de k_V es mayor que el k_H , esto es lo opuesto a lo que ocurre en todas las demás areniscas.

En el caso de Schleeriether se puede observar una correlación lineal positiva entre la porosidad y la permeabilidad, en el rango de porosidad entre 12 y 16% y de permeabilidad entre 0,05 a 1,2 mD (ver figura 7.4).

Cuando se analizan todas las areniscas estudiadas en esta investigación en su conjunto se puede realizar algunas observaciones generales (ver figuras 7.6 y 7.7):

- a. Aquellas areniscas con mayor porosidad tienen la mayor permeabilidad. Este es el caso de Bad Bentheim y Obernkirchen.
- b. Las areniscas con menor porosidad presentan la menor permeabilidad. Estas son Tambach y Weser rot.

- c. Las areniscas con porosidad intermedia presentan valores bajos de permeabilidad, pero mayores a los que poseen las areniscas menos porosas. Este es el caso de Bebertal, Weser grau, Schleeriether y Sander.

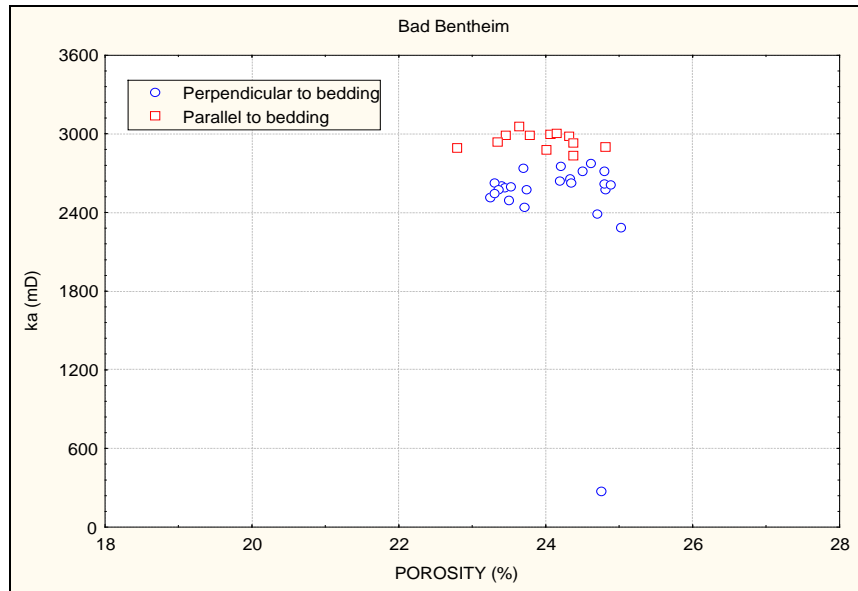


Figura 7.5: Permeabilidad versus Porosidad en Bad Bentheim.

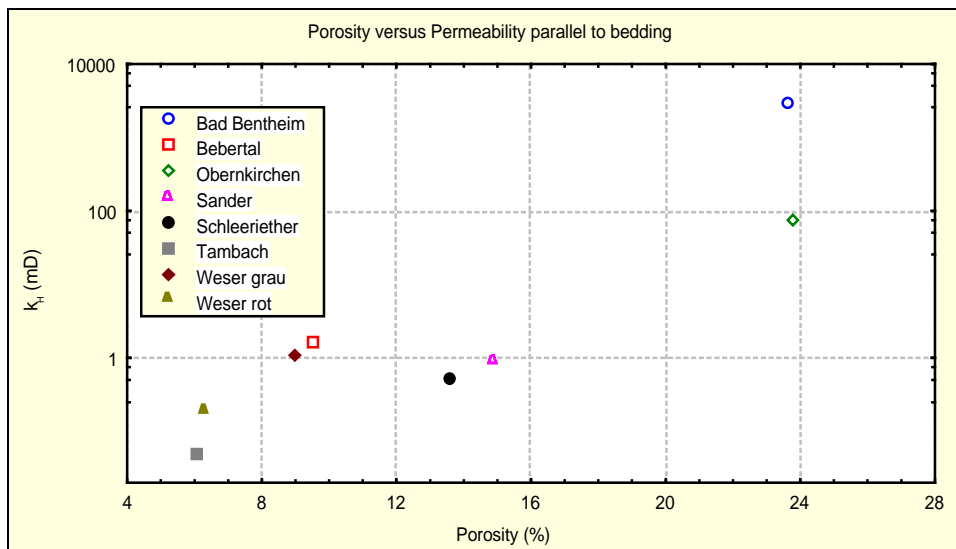


Figura 7.6: Permeabilidad paralela a la estratificación (k_H) versus Porosidad para todas las areniscas.

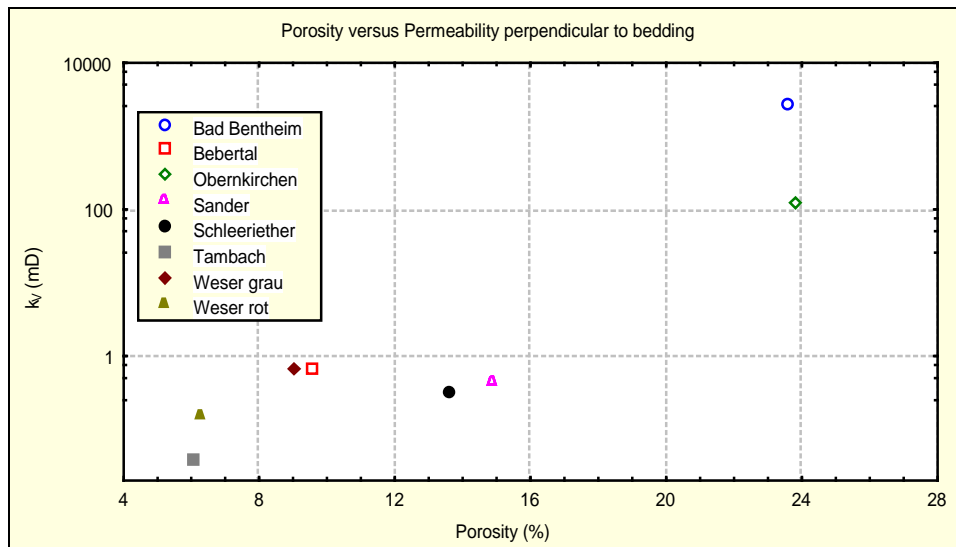


Figura 7.7: Permeabilidad perpendicular a la estratificación versus Porosidad para todas las areniscas.

De la observación de los gráficos de distribución de tamaños de poros obtenidos por los Ensayos de Porosimetría de Inyección de Mercurio (figura 6.2) y los gráficos de Permeabilidad versus Porosidad (Anexo II), pueden ser separados cuatro grupos de areniscas con distribución de tamaños de poros, porosidades y permeabilidades similares:

a. Alta porosidad y macroporos:

Las areniscas más porosas son Bad Bentheim y Obernkirchen, la primera con un valor promedio de 23,6%, siendo un 39% de esta de tamaños de poros entre 28 a 46 micras (macroporos), y la última con una porosidad promedio de 23,81%, siendo un 39% de esta representada por macroporos de tamaños entre 10 a 28 micras. Estas areniscas tienen los valores medios más altos de permeabilidad horizontal (k_H), Bad Bentheim hasta 2950 mD y Obernkirchen hasta 72,5 mD. Estos altos valores de permeabilidad se pueden explicar por la presencia de poros grandes, a su vez está relacionada al escaso cemento y el gran tamaño relativo de los granos que tienen estas areniscas (grano grueso en el caso de Bad Bentheim y grano medio en Obernkirchen).

b. Porosidad media y distribución bimodal de tamaño de poros (macroporos y mesoporos):

Sander y Schleeriether presentan una porosidad intermedia con valores promedio de 14,86% y 13,57%, respectivamente. Ambas areniscas tienen un tamaño de grano medio. Schleeriether tiene una k_H de 0,54 y Sander de 0,92mD. La distribución del tamaño de poros de estas areniscas, muestra un padrón similar, aunque sus valores más altos son diferentes. Ambas presentan una distribución bimodal, con un máximo en los valores que corresponden a mesoporos (0,028 a 0,064 micras en Schleeriether y 0,046 a 0,064 micras en Sander) y otro en los macroporos (0,64 a 1 micras en Schleeriether y 0,82 a 2,8 micras en Sander). Sander presenta una porosidad mayor y mayor tamaño

de poros, esto puede ser la causa de los valores levemente más altos de permeabilidad que Schleeriether.

c. Baja porosidad y macroporos:

Weser grau y Bebertal tienen ambas una porosidad de alrededor al 9% (9,02 y 9,54, respectivamente), su k_H es 1,58 y 1,07, respectivamente. Los gráficos de distribución de tamaño de poros muestra que los máximos están entre 1 y 4,6 micras en el caso de Weser Grau (representando alrededor del 25% de la porosidad), y entre 1 y 2,8 micras en el caso de Bebertal (alrededor del 20% de la porosidad). Los valores más altos de permeabilidad en el caso de Weser grau están relacionados probablemente, al mayor tamaño de poro, la mayor proporción de estos en la roca y la mejor selección (buena) que presenta en comparación con Bebertal (selección mala a moderada).

d. Muy baja porosidad y macroporos:

Las areniscas menos porosas son Tambach y Weser rot, con porosidades de 6,04 y 6,31%, respectivamente. Ambas areniscas presentan tamaño de grano medio. Tambach presenta los valores más bajos de permeabilidad, su k_H es de 0,05mD, seguida por Weser rot con 0,19mD. Los poros más grandes de estas areniscas, que se corresponden con los máximos en los histogramas de distribución de tamaño de poros, son de 0,1 a 0,46 micras y 0,46 a 0,82 micras, respectivamente. En ambos casos estos poros representan el 50% de la porosidad. Nuevamente se puede relacionar la más alta permeabilidad relativa de Weser rot con relación a Tambach con el tamaño de poros relativamente mayor que presenta esta arenisca.

7.3. Porosidad y Resistencia

La relación entre estas dos propiedades es analizada teniendo en cuenta solamente los ensayos UCS 3, analizando su valor absoluto y relativo. Se pueden observar gráficos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) absoluta versus porosidad para especímenes completamente saturados y completamente secos en las dos direcciones consideradas (paralela y perpendicular a la estratificación) en las figuras 7.8 a 7.11.

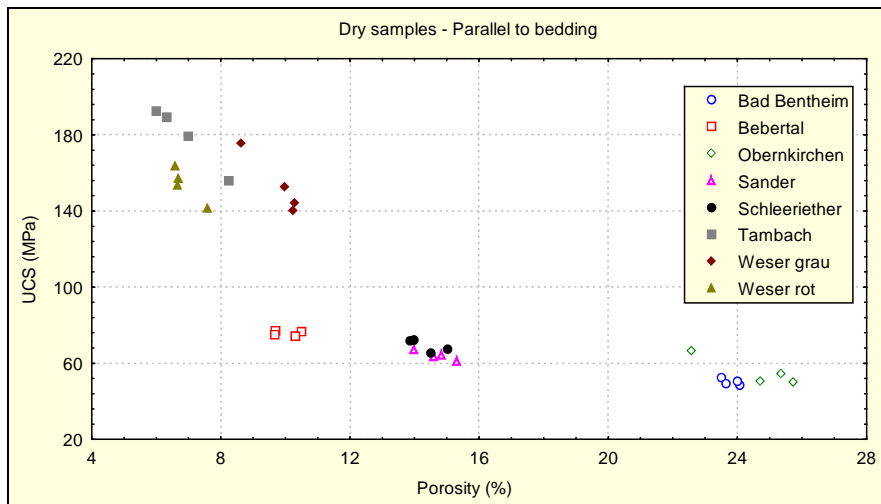


Figura 7.8: Resistencia (UCS) versus Porosidad en muestras secas, dirección paralela a la estratificación – Ensayo UCS 3.

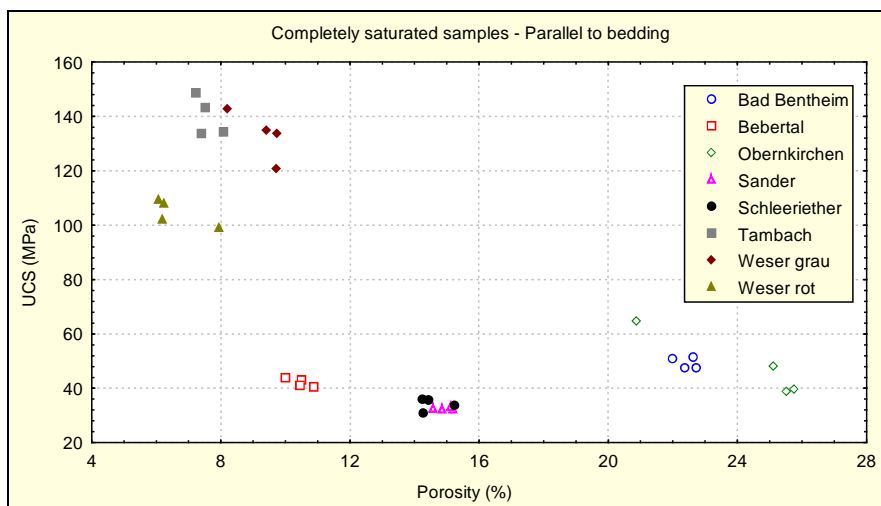


Figura 7.9: Resistencia (UCS) versus Porosidad en muestras saturadas, dirección paralela a la estratificación – Ensayo UCS 3.

El valor de UCS utilizado en los análisis siguientes es un promedio de los valores de UCS en muestras secas y en considerado en la dirección perpendicular a la estratificación, ya que en general estos son los valores más altos registrados para cada arenisca.

Se pueden separar los mismos cuatro grupos de areniscas que se describieron en el capítulo 7.2:

a. Alta porosidad:

La resistencia absoluta es la más baja de todas las areniscas, para Bad Bentheim 50 MPa y para Obernkirchen 64 MPa. La resistencia relativa no muestra cambios, teniendo estas areniscas casi la misma resistencia en condiciones de saturación total y completamente secas.

b. Porosidad media:

Estas areniscas presentan valores de resistencia intermedios, en el caso de Sander 71 MPa y en el de Schleeriether 84 MPa. En términos relativos la

resistencia muestra una pérdida del 50% en la resistencia desde una condición seca a una completamente saturada en agua.

c. Baja porosidad:

Las areniscas con baja porosidad muestran comportamientos distintos. En el caso de Bebertal la resistencia absoluta es media, con un valor de 93 MPa. Weser grau, por otro lado, presenta una resistencia absoluta alta de 165 MPa. En términos relativos Bebertal presenta una pérdida de resistencia de 40% cuando es saturada en agua y Weser grau pierde un 15% de su resistencia al pasar de un estado completamente seco a otro completamente saturado en agua.

d. Muy baja porosidad:

Como se puede esperar estas areniscas presentan los valores más altos de resistencia, de 146 MPa para Weser rot y 205 MPa para Tambach, la arenisca más resistente de todas las estudiadas en esta investigación. La resistencia relativa muestra una alta dispersión en los valores, pero presenta un descenso del 35 y 30%, respectivamente, de un estado seco a otro completamente saturado en agua.

Areniscas	Poros	
	P _{ef} (%)	Tamaño (μ)
Ba	23,6	28 a 46
Be	9,54	1 a 2,8
Ob	23,81	10 a 28
Sa	14,86	0,82 a 2,8
Sc	13,57	0,64 a 1
Ta	6,04	0,1 a 0,28
Wg	9,02	1 a 2,8
Wr	6,31	0,46 a 0,82

Tabla 7.6: Valores de Porosidad y máximos en la distribución de tamaños de poros para todas las areniscas.

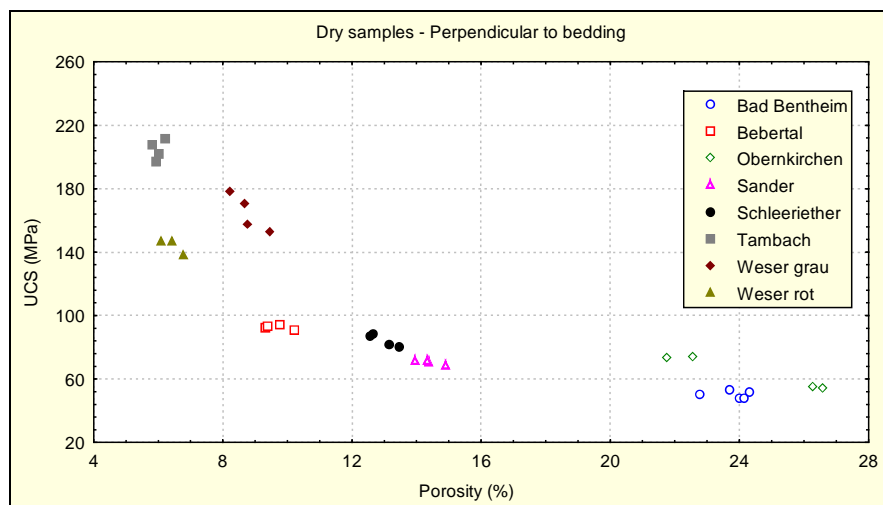


Figura 7.10: Resistencia (UCS) versus Porosidad en muestras secas, dirección perpendicular a la estratificación – Ensayo UCS 3.

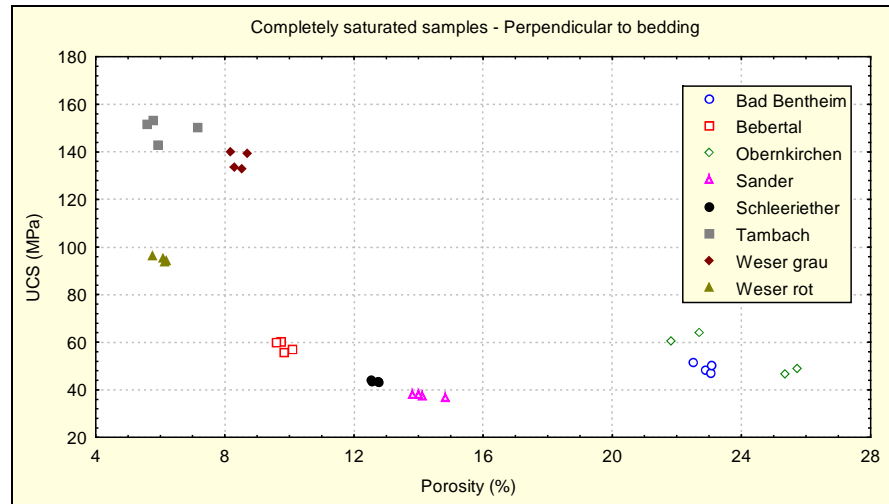


Figura 7.11: Resistencia (UCS) versus Porosidad en muestras saturadas, dirección perpendicular a la estratificación – Ensayo UCS 3.

7.4. Densidad y Resistencia

Como en el ítem anterior, solamente los valores obtenidos en el ensayo UCS 3 serán considerados aquí. Las figuras 7.12 a 7.15 ilustran la relación entre resistencia a la compresión uniaxial y densidad.

En el caso de la relación entre densidad y resistencia, se llega a conclusiones similares a las descritas al relacionar porosidad y resistencia. La porosidad está relacionada inversamente con la densidad (como se muestra en el capítulo 7.1) e inversamente relacionada con la resistencia, por lo tanto la densidad está directamente relacionada con la resistencia.

Aquellas areniscas con la densidad más baja, Bad Bentheim y Obernkirchen, tienen ambas valores promedios de 2.03 g/cm^3 y presentan la más baja resistencia.

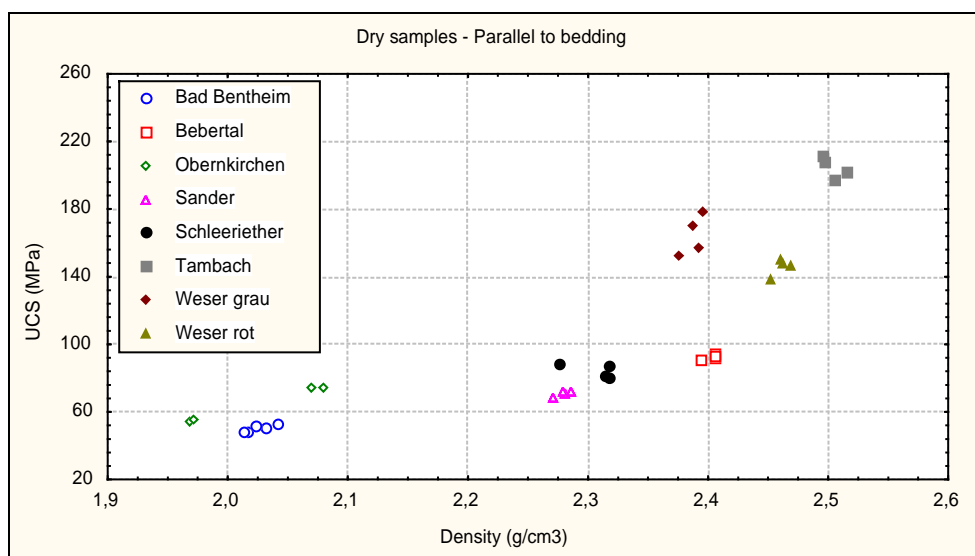


Figura 7.12: Resistencia versus Densidad para muestras secas, dirección paralela a la estratificación – Ensayo UCS 3.

Sander y Schleeriether presentan densidades intermedias: 2,28 y 2,32 g/cm³, respectivamente, y presentan valores intermedios de resistencia.

Bebertal presenta una densidad relativamente alta de 2,4 g/cm³ y también una resistencia alta. Pero el caso de Weser grau, con una densidad de 2,39 g/cm³ pero con una resistencia muy alta, está mostrando que la densidad, o la porosidad, no es el único factor que determina la resistencia de una arenisca.

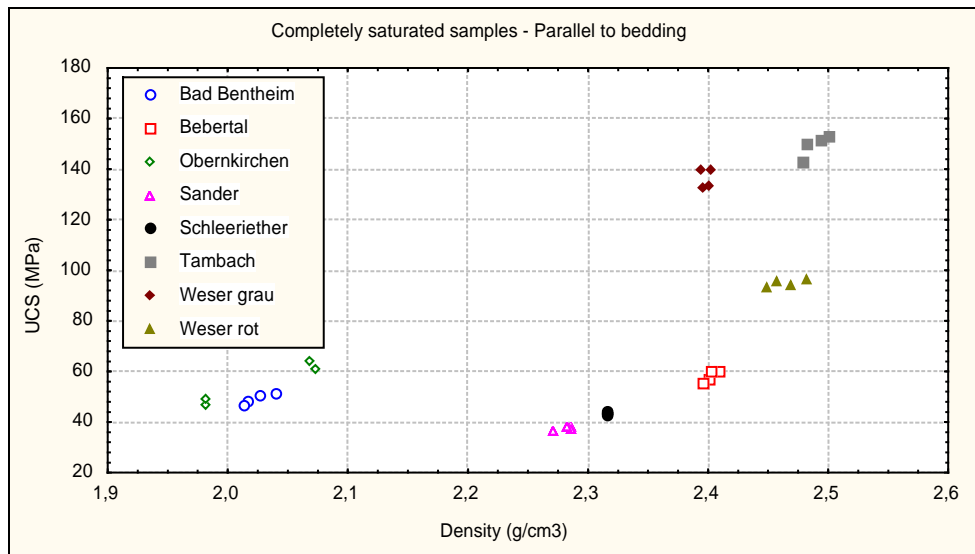


Figura 7.13: Resistencia versus Densidad para muestras completamente saturadas, dirección paralela a la estratificación – Ensayo UCS 3.

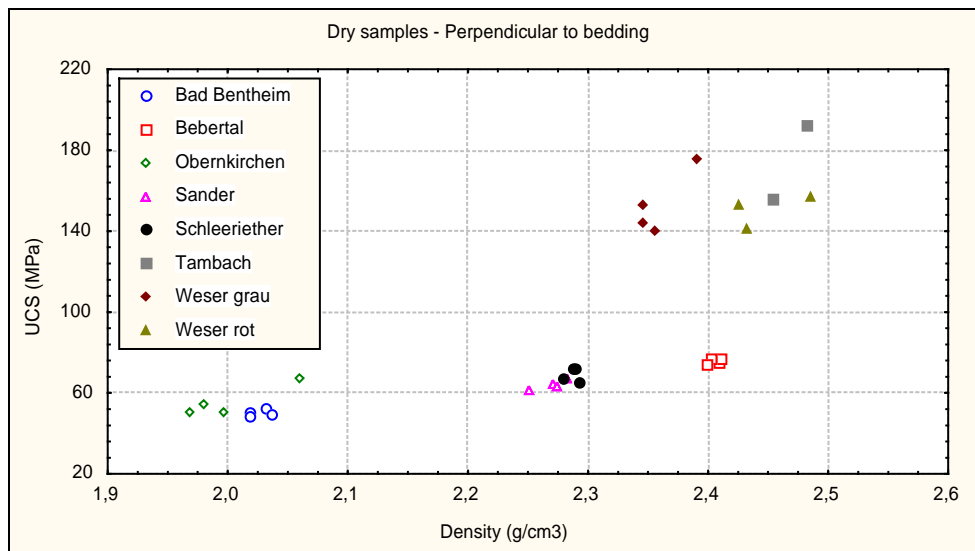


Figura 7.14: Resistencia versus Densidad para muestras secas, dirección perpendicular a la estratificación – Ensayo UCS 3.

Finalmente, aquellas areniscas con una densidad muy alta, Tambach con 2,5 g/cm³ y Weser rot con 2,46 g/cm³, presentan las resistencias más altas registradas en esta investigación.

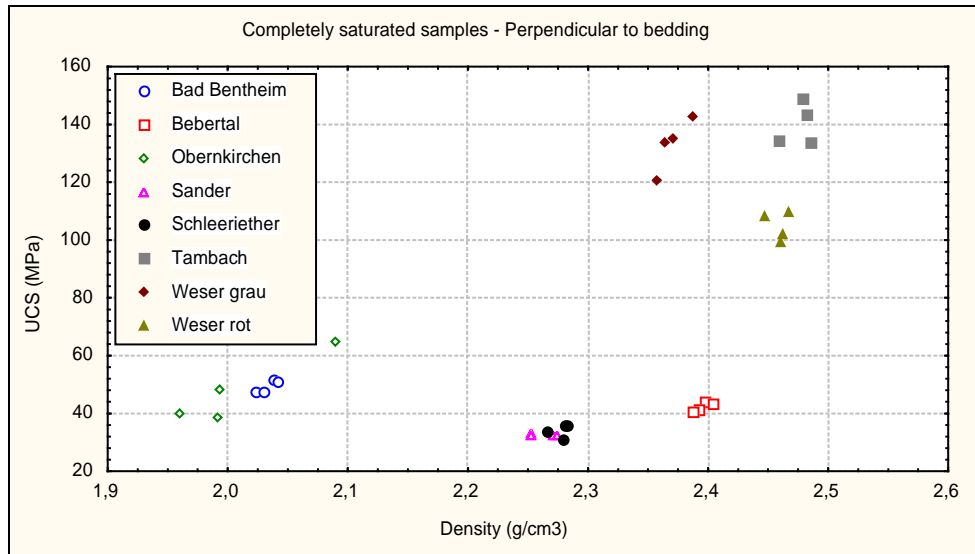


Figura 7.15: Resistencia versus Densidad para muestras completamente saturadas, dirección perpendicular a la estratificación – Ensayo UCS 3.

7.5. Contenido de agua y Resistencia

Cuando se analizan los resultados obtenidos en los ensayos de UCS usando los gráficos de resistencia versus contenido de agua (Anexo I y figuras 7.16 a 7.23) se pueden realizar algunas observaciones:

- a.** Hay una arenisca que claramente no muestra sensibilidad al contenido de agua en su resistencia: Bad Bentheim. Presenta los mismos valores relativos para las condiciones estudiadas: completamente saturada, parcialmente saturada y completamente seca. Presenta el valor más bajo de resistencia absoluta, de alrededor de 50 MPa, para ambas direcciones consideradas, paralela y perpendicular a la estratificación.
- b.** En los casos de Weser grau y Obernkirchen la sensibilidad es muy baja, los valores de resistencia obtenidos muestran una gran dispersión, pero los valores promedio de UCS realizados en condiciones secas y saturadas muestran una pérdida en la resistencia de casi un 15%. A pesar de su comportamiento similar en las resistencia relativas, su resistencia absoluta es muy diferente, 64 MPa en el caso de Obernkirchen (en condiciones secas y con el esfuerzo aplicado perpendicularmente a la estratificación) y de 165 MPa para Weser grau en las mismas condiciones.
- c.** Los casos más claros de sensibilidad al contenido de agua en su resistencia son Sander y Schleieriether. La primera arenisca presenta la misma resistencia relativa para los dos ensayos UCS realizados (UCS 1 y UCS 3), una pérdida del 50% del estado seco al completamente saturado. Schleieriether experimentó una pérdida de resistencia de alrededor del 35% del estado seco al completamente saturado. Su resistencia absoluta para los especímenes secos cuando el esfuerzo es aplicado en la

dirección perpendicular a la estratificación es de 71 MPa para Sander y de 84 MPa para Schleeriether.

d. Tambach y Weser rot presentan una sensibilidad intermedia al contenido de agua. Tambach muestra la diferencia mayor de sensibilidad cuando el esfuerzo es aplicado perpendicularmente a la estratificación (5%) y paralelo a esta (22%). Weser rot presenta una sensibilidad igual en ambas direcciones con respecto a la estratificación: pierde un 32% de su resistencia al pasar de un estado seco a uno completamente saturado. Ambas areniscas presentan las resistencias absolutas más altas, de 204 MPa en el caso de Tambach y 145 MPa en el caso de Weser rot, en ambos casos considerando el estado seco y siendo el esfuerzo aplicado en la dirección perpendicular a la estratificación.

e. Bebertal presenta una alta sensibilidad en la resistencia al contenido de agua desde el estado seco al completamente saturado, con un valor aproximado del 40%. La resistencia absoluta del estado seco cuando el esfuerzo es aplicado perpendicularmente a la estratificación es de 93 MPa.

f. En los casos de las areniscas que muestran una sensibilidad al contenido de agua, se observa que los valores de resistencia cuando el esfuerzo se aplica perpendicularmente a la estratificación es mayor que cuando se lo aplica paralelo a esta.

g. En los casos en que las areniscas muestran una fuerte sensibilidad al contenido de agua, se observa un comportamiento que puede ser expresado por una curva exponencial negativa. Hay una pérdida del 20 al 25% de la resistencia cuando se pasa del estado seco a un 10% de saturación en agua y del 35 al 50% cuando se pasa al estado completamente saturado.

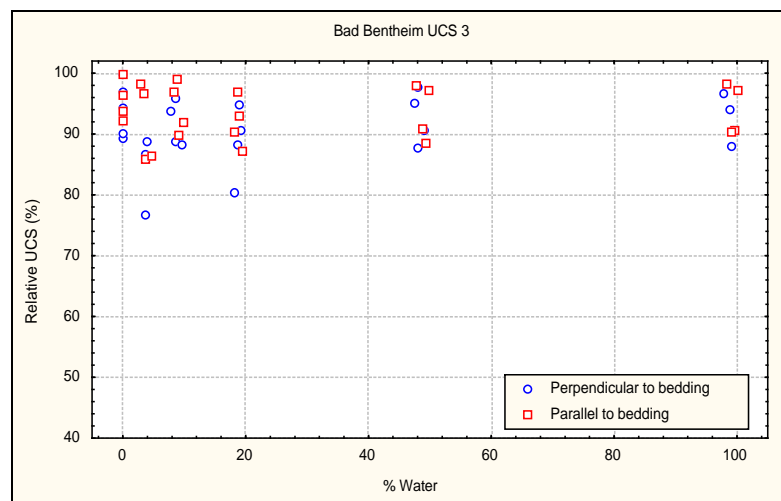


Figura 7.16: UCS relativa versus contenido de agua para Bad Bentheim en UCS 3.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

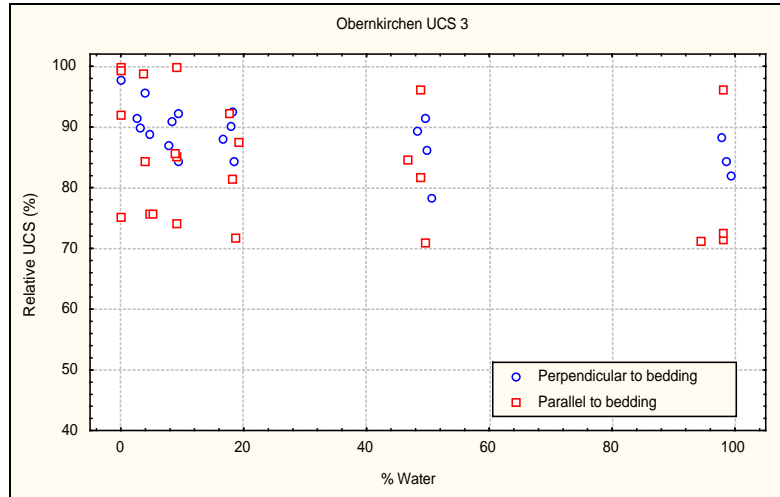


Figura 7.17: UCS relativa versus contenido de agua para Obenkirchen en UCS 3.

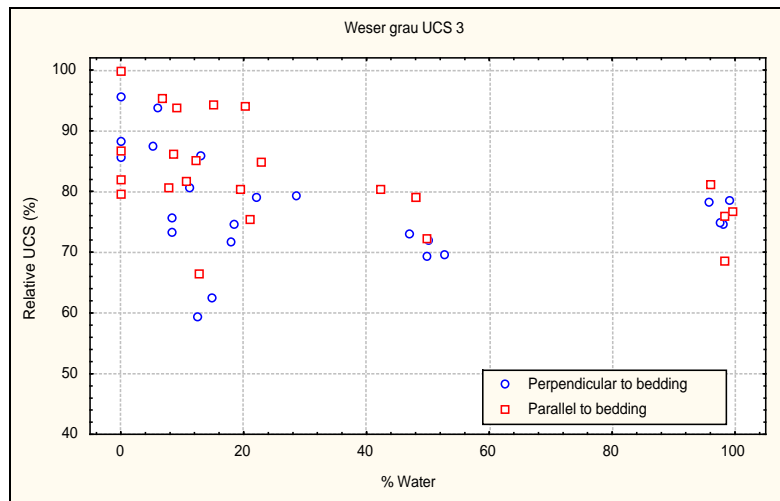


Figura 7.18: UCS relativa versus contenido de agua para Weser grau en UCS 3.

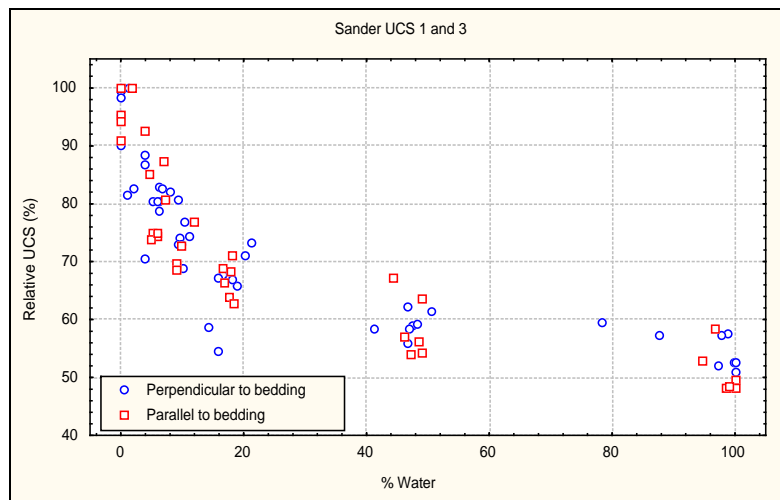


Figura 7.19: UCS relativa versus contenido de agua para Sander en UCS 3 y UCS 1.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

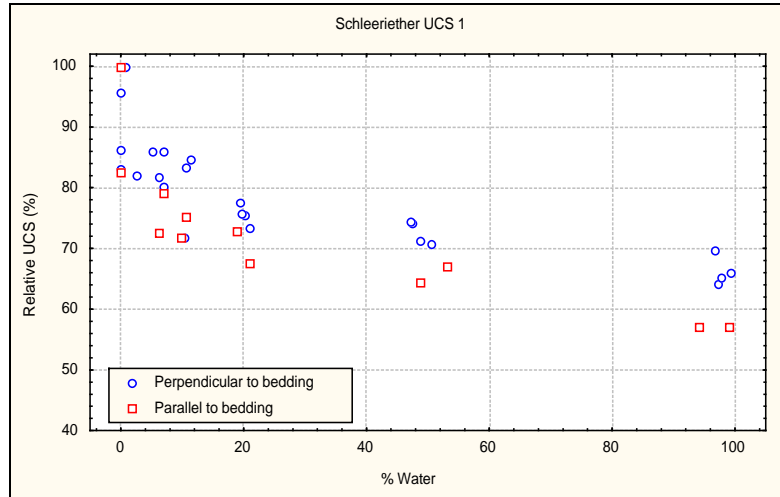


Figura 7.20: UCS relativa versus contenido de agua para Schleeriether en UCS 1.

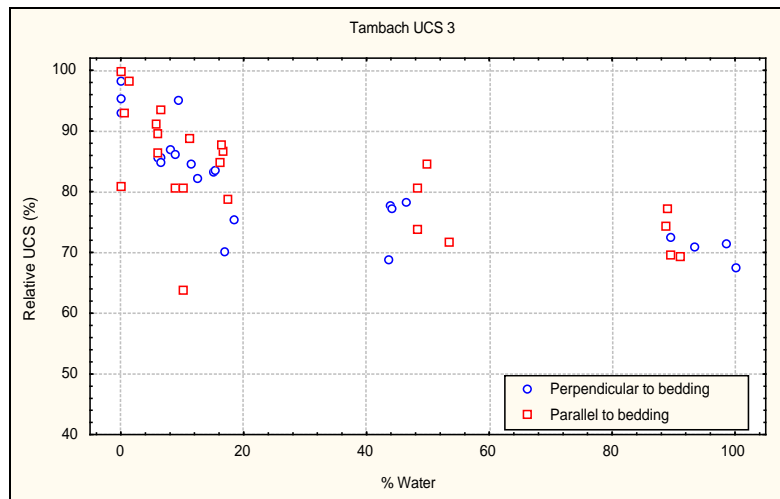


Figura 7.21: UCS relativa versus contenido de agua para Tambach en UCS 3.

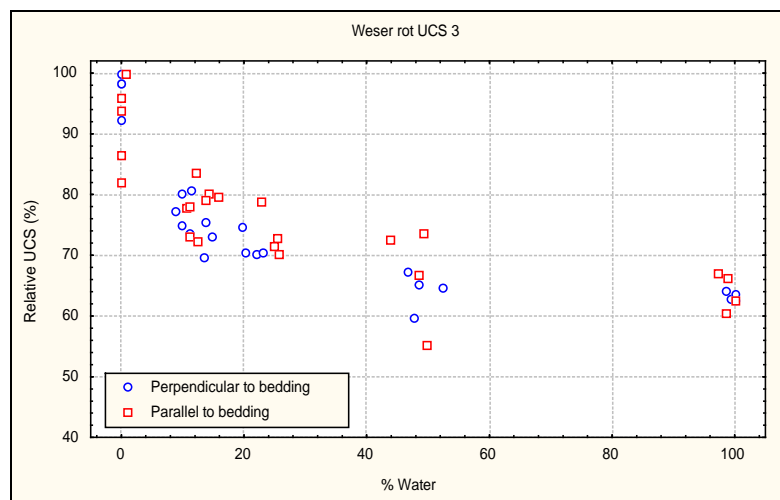


Figura 7.22: UCS relativa versus contenido de agua para Weser rot en UCS 3.

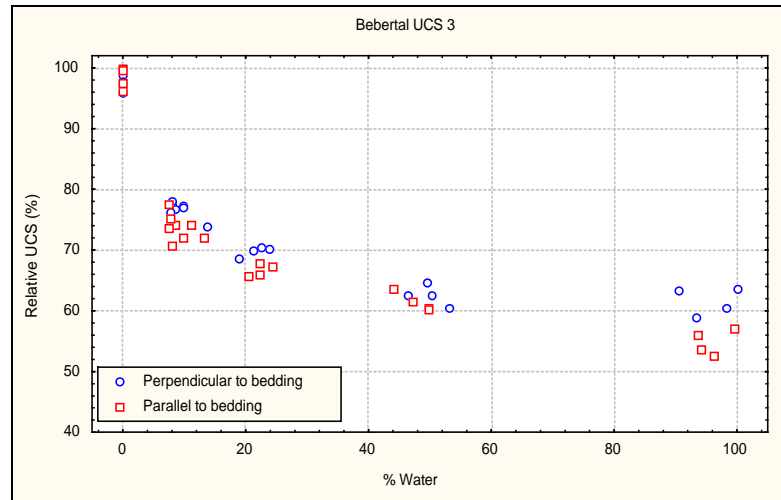


Figura 7.23: UCS relativa versus contenido de agua para Bebertal en UCS 3.

Arenisca	Paralela a estratificación			Perpendicular a estratificación		
	UCS _s (MPa)	UCS _h (MPa)	Sens.Rel. 0-100% (%)	UCS _s (MPa)	UCS _h (MPa)	Sens.Rel. 0-100% (%)
Ba	50,2	49,5	1,4	50,4	49,4	2,0
Be	75,8	42,2	44,0	92,8	58,2	37,0
Ob	55,6	48,0	14,0	64,4	55,2	14,0
Sa	64,0	32,7	49,0	70,7	37,5	47,0
Sc	69,3	34,3	50,5	84,4	43,5	48,5
Ta	179,4	140,0	22,0	204,6	194,6	5,0
Wg	153,4	133,2	13,0	164,8	136,5	17,0
Wr	154,0	104,8	32,0	145,5	94,9	32,0

Tabla 7.7: Promedio de valores de UCS para condiciones secas (UCS_s) y completamente saturadas (UCS_h), sensibilidad relativa (en porcentaje) al contenido en agua desde condiciones secas a completamente saturadas (Sens. Rel. 0-100% (%)).

7.6. Ensayos Brasil y UCS

La comparación entre estos dos ensayos mecánicos: UCS y Brasil (para tres areniscas: Bad Bentheim, Obernkirchen y Bebertal) muestra que:

a. Los valores absolutos de resistencia son entre 14 y 22 veces mayor en los ensayos UCS que en los ensayos Brasil.

b. Como el ensayo Brasil para Bebertal fue realizado solamente para condiciones secas y de saturación parcial de agua de 5, 10 y 20%, el impacto de esta saturación no es muy claro. Pero una pérdida de resistencia de entre 10 a 25% es registrada desde la condición seca al 20% de saturación en agua.

c. En el caso de Bad Bentheim la ausencia de sensibilidad al contenido de humedad registrada en los ensayos UCS se observa también en los ensayos Brasil.

d. Para Obernkirchen la relación entre estos dos ensayos depende de la dirección del esfuerzo aplicado en relación con la estratificación. Para la dirección Y (ver figura 5.9) en el ensayo Brasil se observa una sensibilidad, con una pérdida de alrededor del 40% de resistencia del estado seco al saturado, mucho más alto que en el caso de los ensayos UCS, donde se registró una pérdida del 14% en las dos direcciones consideradas. En el ensayo Brasil en las otras dos direcciones consideradas no se observó sensibilidad al contenido de agua.

7.7. Dimensión de Muestras y Resistencia

Los resultados de los ensayos UCS para los dos tipos de muestras cilíndricas utilizadas muestran que existe un impacto de la dimensión de las muestras en los valores de resistencia obtenidos (ver Anexo II y figura 7.24). Los ensayos UCS realizados con una dimensión de muestra de 25 mm de diámetro y 50 mm de largo se identifican como UCS 3; y los ensayos realizados en muestras de 25 mm de diámetro y 40 o menos mm de largo se identifican como UCS 1. En los casos de Weser grau y Weser rot solamente los ensayos UCS 3 fueron realizados.

La comparación entre los resultados de ambos ensayos muestran que los valores absolutos de resistencia son mayores en los ensayos UCS 3 que en los UCS 1. En el único caso en el que las dimensiones de la muestra no muestran un impacto en los valores de resistencia es en los ensayos realizados en Sander.

Analizando los valores relativos de resistencia se puede observar que en el ensayo UCS 1 hay una mayor dispersión de los valores, particularmente en el caso de Bebertal. En el caso de Schleeriether la pérdida de resistencia con la saturación de agua desde un estado seco es mayor en el ensayo UCS 3 (50%) que en el UCS 1 (40%). En el caso de Bebertal en el ensayo UCS 1 no hay una correlación clara entre saturación de agua y resistencia, pero en el ensayo UCS 3 hay una clara sensibilidad al contenido de agua, siguiendo su comportamiento una curva exponencial negativa. Tambach tiene un comportamiento similar que Bebertal, no mostrando una clara sensibilidad al contenido de agua en el ensayo UCS 1 pero una clara pérdida del 35% de su resistencia del estado seco al completamente saturado en el ensayo UCS 3.

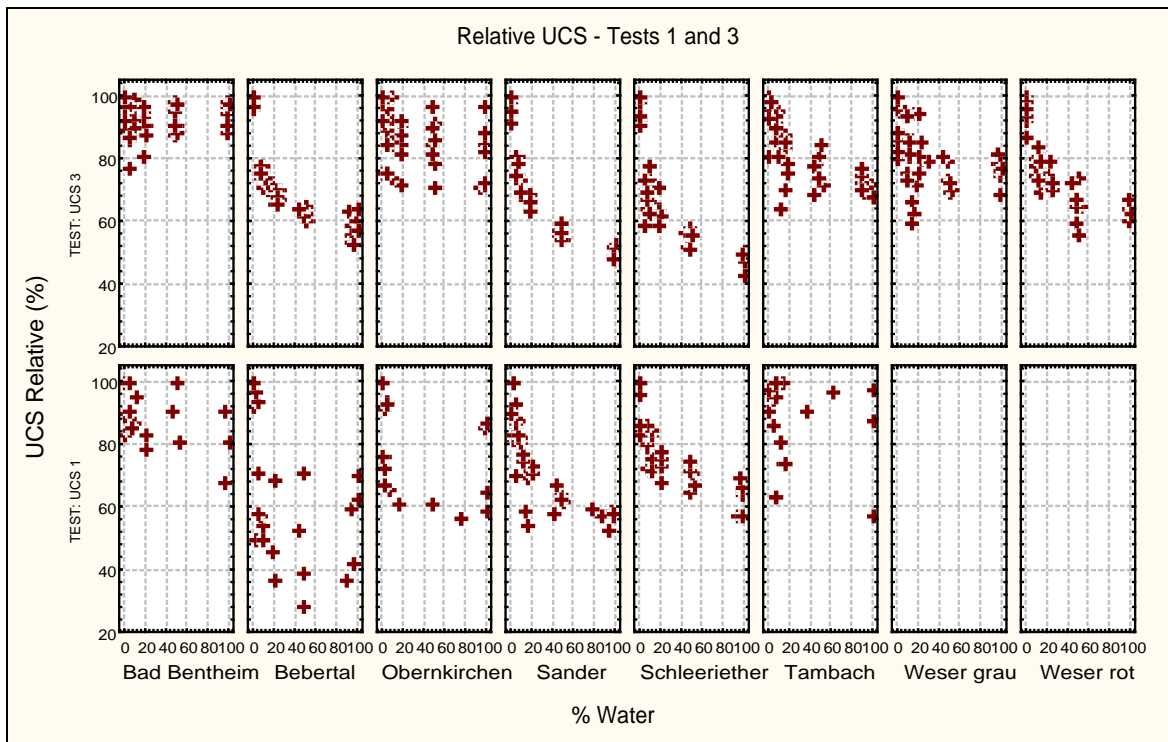


Figura 7.24: Comparación entre los ensayos UCS 1 y UCS 3 (ver explicación en el texto); considerando las dos direcciones de los esfuerzos aplicados con relación a la estratificación.

Estos resultados demuestran que la dimensión de la muestra es un factor importante que debe ser tenido en cuenta cuando se analizan datos de UCS.

7.8. Conclusiones

Las principales conclusiones de esta investigación se pueden resumir en:

a. Los valores de resistencia registrados en los ensayos mecánicos no siempre decrecen con el aumento de contenido en agua (ver figura 7.16). Esto contrasta con la premisa sostenida por el US Army Rock Testing Handbook (1995) de que la resistencia de las rocas decrece con el aumento del contenido en agua.

b. La porosidad es inversamente proporcional a la densidad y el grado de cementación de la roca, así como también a su resistencia absoluta. Pero la porosidad no es el único factor que determina la sensibilidad de la resistencia al contenido de agua ya que en esta investigación las areniscas más sensibles tienen una porosidad media.

c. Los principales factores que determinan el impacto de la saturación parcial en agua en la resistencia de las rocas son en primer lugar la mineralogía y en segundo la cantidad de cemento. En la tabla 7.8 se puede observar una síntesis de las características petrográficas y los valores de las propiedades petrofísicas de las areniscas estudiadas.

El Impacto de la Saturación Parcial de Agua en la Resistencia de las Rocas:
Un Estudio Experimental en Areniscas.

Ar	Tipo	Mineralogía										Propiedades petrofísicas											
		Esqueleto (%)					Matriz (%)		Cemento			No direccionales		Direccionales									
		Qz	FL	Fp	Fil	Granul (μ)	Arc Exp	Caol	SiO ₂	Calc	Hem	ρ (g/cm ³)	Por (%)	Paralela a estratificación					Perpendicular a estratificación				
												UCS _s (MPa)	UCS _h (MPa)	Sens (%)	k _H (mD)	Exp hig	UCS _s (MPa)	UCS _h (MPa)	Sens (%)	k _v (mD)	Exp hig		
Ba	Ar Qz	98	<1	<1	<1	960		<5	e.	e.	2,02	23,6	50,2	49,5	1,4	2951	0,04	50,4	49,4	2	2622	0,05	
Be	Sublitar	90	5	<3	1	1500			c.	m.f.	2,4	6,5	75,8	42,2	44	1,58	0,35	92,8	58,2	37	0,69	0,4	
Ob	Ar Qz	98			<1	300		<5	e.	e.	2,01	23,8	55,6	48	14	72,5	0,1	64,4	55,2	14	125	0,16	
Sa	Sublitar	80	<15	3	<5	310	Si		c.	e.	e.	2,27	14,9	64	32,7	49	0,92	0,22	70,7	37,5	47	0,44	0,59
Sc	Sublitar	80	<15	3	<2	440	Si		e.	e.	e.	2,3	13,6	69,3	34,3	50,5	0,54	0,56	84,4	43,5	48,5	0,33	0,83
Ta	Ar Qz	95	1	<3	1	380			m.f.	m.f.	m.f.	2,49	6	179,4	140	22	0,05	0,21	204,6	194,6	5	0,04	1,85
Wg	Subarc	70	<2	25	1	800			m.f.		e.	2,38	9	153,4	133,2	13	1,07	0,07	164,8	136,5	17	0,66	0,14
Wr	Arc a Subarc	85	<1	<20	2	440			m.f.	c.	m.f.	2,46	6	154	104,8	32	0,19	0,13	145,5	94,9	32	0,16	0,34

Tabla 7.8: Síntesis de las propiedades petrográficas y petrofísicas determinadas en esta investigación (Ar: areniscas, Ar Qz: arenita cuarzosa, Sublit: sublitenitas, Subarc: subarcosa, Arc: Arcosa, Qz: cuarzo, FL: fragmentos líticos, Fp: feldespatos, Fil.: filosilicatos, Granul: granulometría, Arc Exp: arcillas expansivas, Caol: caolinita, SiO₂: sílice, Calc: calcita, Hem: hematita, ρ: densidad, Por: porosidad, UCS_s: resistencia a la compresión uniaxial en muestra seca, UCS_h: resistencia a la compresión uniaxial en muestra 100% saturada, Sens: sensibilidad, k_H: permeabilidad horizontal, Exp hig: expansión higroscópica, k_v: permeabilidad vertical; e.: escaso; c.: común; m.f.: muy frecuente).

Las arenitas cuarzosas puras muestran baja o ninguna sensibilidad a la saturación en agua incluso cuando están pobremente cementadas (Bad Bentheim y Obernkirchen, figuras 7.16 y 7.17, respectivamente) y baja sensibilidad cuando están altamente cementadas (Weser Grau, figura 7.18).

Aquellas areniscas con minerales arcillosos y filosilicatos y/o alta expansión higroscópica muestran la mayor sensibilidad al contenido de agua (Sander, Schleeriether, Bebertal, Weser rot y Tambach, figuras 7.19 a 7.23, respectivamente).

Estos resultados están parcialmente de acuerdo con los de Hawkins y McConnell (1992) que concluyeron que “el grado de sensibilidad al contenido de humedad está controlado primariamente por las proporciones de cuarzo y minerales de arcilla presentes y en una menor medida por la microfábrica de la roca”. En la presente investigación, la fracción arcilla no fue separada para estudiar específicamente su mineralogía. De todas formas se obtuvo información acerca de la presencia de minerales arcillosos en el estudio microscópico (polarización y cátodo-luminiscencia), en la difracción de rayos X y en el ensayo de expansión higroscópica.

d. La resistencia absoluta en los ensayos UCS es normalmente mayor cuando el esfuerzo es aplicado perpendicularmente a la estratificación (figura 7.25), esto está directamente relacionado con el hecho de que el plano de estratificación es un plano natural de debilidad, que disminuye el esfuerzo necesario para la fractura de la roca. Solamente en el caso de Weser grau ocurre lo opuesto (figura 7.26), la mayor resistencia es registrada cuando el esfuerzo se aplica paralelo a la estratificación; no se dispone de una explicación para este comportamiento atípico.

e. El impacto de la dirección de aplicación del esfuerzo con relación al plano de estratificación no es el mismo para todas las areniscas estudiadas en esta investigación. Analizando la resistencia relativa teniendo en cuenta esta estructura de la roca, se puede ver que en los casos de las areniscas que son más sensibles al contenido de agua (Schleeriether, Sander, Bebertal, Weser rot y Tambach) esta sensibilidad es un poco mayor cuando el esfuerzo es aplicado paralelamente a la estratificación. Esto puede relacionarse con el hecho mencionado anteriormente, de que los planos de estratificación son planos naturales de debilidad de la roca y la presencia del agua decrece la cohesión de los granos. En el caso de Weser grau ocurre lo opuesto, la sensibilidad al contenido de agua es mayor cuando el esfuerzo se aplica paralelamente a la estratificación.

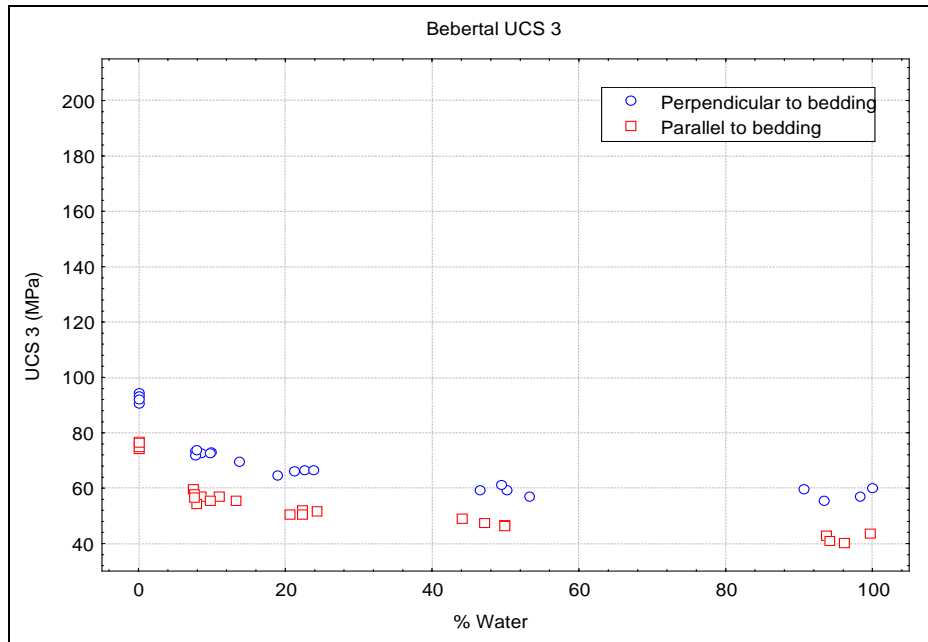


Figura 7.25: UCS versus contenido de agua – Bebertal.

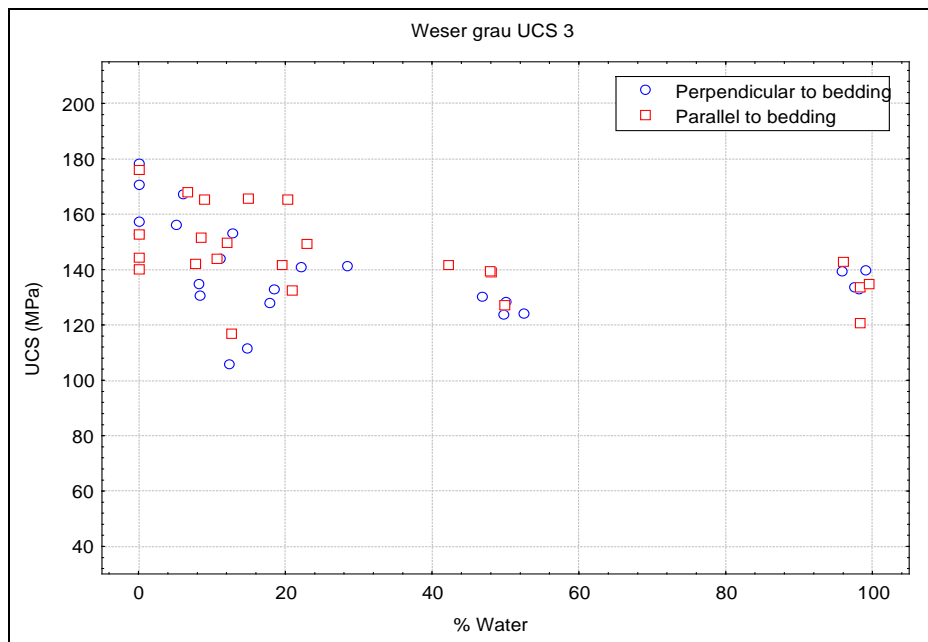


Figura 7.26: UCS versus contenido de agua – Weser grau.

f. La conclusión de que las areniscas más débiles son las más sensibles al contenido de agua (Dyke y Dobereiner, 1991) no se apoya por los resultados obtenidos en esta investigación, ni para los ensayos UCS ni para los ensayos Brasil. Al contrario, la arenisca más débil de todas las estudiadas en la presente investigación (Bad Bentheim) no muestra sensibilidad alguna al contenido de agua y las areniscas con resistencia intermedia (Sander y Schleeriether) presentan la mayor sensibilidad al contenido de agua.

g. Las areniscas con contenido en arcilla y filosilicatos son normalmente pobremente cementadas y su resistencia absoluta no es muy alta (Sander y Schleeriether).

h. Las areniscas que muestran sensibilidad a la saturación parcial de agua tienen un comportamiento que puede ser representado por una curva exponencial negativa. Hay una pérdida relativa de resistencia del 20 al 25% desde un estado seco a un 10% de contenido de agua y una pérdida relativa de resistencia del 35 al 50% desde el estado seco al completamente saturado.

Referencias

1. Acock, A., ORourke, T., Shirmboh, D., Alexander, J., Andersen, G., Kaneko, T., Venkitaraman, A., López-de-Cárdenas, J., Nishi, M., Numasawa, M., Yoshioka, K, Roy, A., Wilson, A., Twynam, A. 2004. *Métodos prácticos de manejo de la producción de arena*. Oilfield Review, 10-29.
2. Carneiro, F.L. 1953. *Um Novo Método para a Determinação da Resistência à Tração dos Concretos*. Comunicação 5. Reun. Ass. Bras. Normas Técnicas. Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio de Janeiro. Publicado en boletín nº13, RILEM, p. 103-107. Paris.
3. Dott, R.H.J. 1964. *Wacke, graywacke, and matrix- What approach to immature sandstones classification?* Journal of Sedimentary Petrology, 34 : 625-632.
4. Dyke, C.G., Dobereiner, L. 1991. *Evaluating the strength and deformability of sandstones*. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology 24: 123-134.
5. Formoso, M.L.L. 1984. *Difratometria de Raios X, En Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à Geologia*. Coordinación: Celso B. Gomes, São Paulo, Edgard Blücher: PROMINÉRIO.
6. Han, G., Dusseaul, M.B., Cook, J. 2002. *Quantifying Rock Capillary Strength Behavior in Unconsolidated Sandstones*, SPE/ISRM 78170.
7. Han, G., Dusseault, M.B., Cook, J. 2004. *Why sand fails after water breakthrough*. ARMA/NARMS 04-505.
8. Hawkins, A.B., McConnel, B.J. 1992. *Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 25, 115-130. The Geological Society.
9. Henningsen, D., Katzung, G. 1992. *Einführung in die Geologie Deutschlands*. 4th Edition. dtv Wissenschaft, Enke Verlag, Stuttgart: pp 228.
10. International Society for Rock Mechanics. 1977. *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. 143-151.
11. International Society for Rock Mechanics. 1979. *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. 137-140.

12. International Society for Rocks Mechanics. 1978. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. *Suggested methods for determining tensile strength of rock materials*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 99-103. Pergamon Press Ltd.
13. International Union of Pure and Applied Chemistry. 1971. Division of Physical Chemistry. *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units. Apendix II. Definitions, Terminology and Symbols In Colloid and Surface Chemistry. Part I*. Adopted by the IUPAC Council at Washington DC, USA on 23 July 1971. Prepared for Internet Consultation 2001.
14. Tucker, M (editor). 1991. *Techniques in Sedimentology*, Blackwell Scientific Publications.
15. Miller, J. 1991. *Cathodoluminescence microscopy*. En *Techniques in Sedimentology*, edited by Maurice Tucker, Blackwell Scientific Publications.
16. Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R. 1987. *Sand and Sandstones*, 2nd edition, Springer-Verlag.
17. Scholle, P.A. 1979. *A Collor Illustrated Guide to Constituents, Textures, Cements and Porosities of Sandstones and Associated Rocks*. A.A.P.G. Memoir 28.
18. Tiab, D., Donaldson, E.C. 2004. *Petrophysiscs: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 2nd ed. Elsevier.
19. US Army Rock Testing Handbook. 1995. *Suggested Method for Progressive Saturation of Rock Samples*, 116/95.

Agradecimientos:

Me gustaría agradecerles especialmente al Prof. Dr. Siegfried Siegesmund y al Prof. Dr. Pedro Oyhançabal, que me confiaron una investigación muy interesante y me apoyaron en su realización.

Un gran "Danke schön" a todo el grupo humano que trabaja en Gesteinslabor: Gerd, Hansjörg, Birgitt y Marko, que me enseñaron y ayudaron en mucho más que simplemente realizar un ensayo; especialmente al Dr. Eberhard Jahns que contribuyó a hacer posible mi viaje a Alemania y en cuya compañía trabajé muy a gusto.

En la Facultad de Geociencias de la Georg-August-Universität Göttingen hay muchas personas a las que me gustaría agradecer. En el departamento de Geología Estructural y Geodinámica a: Dr. Jörg Rüdric, Dr. Alfons M. van den Kerkhof, Dr. Stephan Mosh y Susy, Tobias Kracke, Heidrum y todos los estudiantes de Geología que pusieron su granito de arena para hacer esta investigación posible. En el departamento de Sedimentología me gustaría agradecerle al Dr. Cornelius Fischer.

A mis amigos alemanes, especialmente a "Mein Brüder" Alex Wetzel, que tuvo la increíble idea de venir a Uruguay; y que con Lotte "Meine Schwester" y todo el lindo grupo de amigos me cuidaron en Deutschland; y también al casi uruguayo Dr. Klaus Wemmer, que con su humor y sabiduría hizo mis días más brillantes. También a todos los habitantes de Rote Straße 1, que me albergaron en ese hogar tan alemán.

En Uruguay, a mi familia, que siempre me alentó de tantas formas, especialmente a mi mamá, mi "faro en la penumbra". Siempre le voy a estar agradecida a mis amigos por ser exactamente como son. Un especial agradecimiento a mi amigo Federico Cernuschi, quien con paciencia y apuro, tomó algo de su tiempo para ayudarme.

En la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República me gustaría darles las gracias al Prof. Dr. Claudio Gaucher, por sus sugerencias e impresiones; al Prof. Ing. Jorge Spoturno por su apoyo y a todos los docentes de la Licenciatura en Geología, en cuyos cursos me he formado no sólo intelectualmente sino también humanamente.