5. PROJECTES SOBRE EL COMPORTAMENT HM, THM i THMC EN BARRERES ARGILOSES

5.1. INTRODUCCIÓ

Per la gestió final dels RAA s'han preseleccionat com a referència dos tipus de formacions geològiques, les granítiques i les d'argila. Es realitzen dissenys genèrics d'emmagatzematges geològics profunds (Fig. 5.1), en els dos medis, i estudis a llarg termini que inclouen des de dades sobre els radionucleids fins a les característiques i comportament dels components del repositori i la seva modelització.

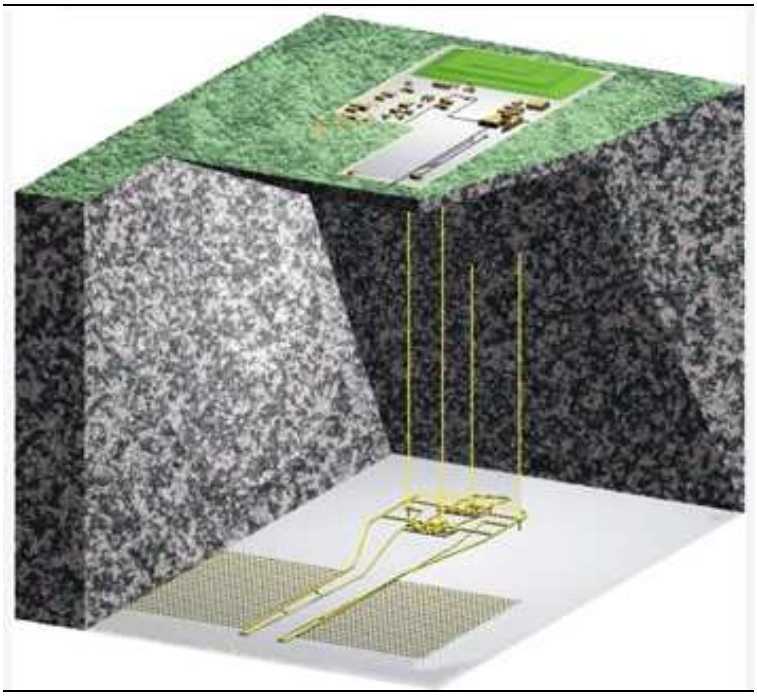

Fig. 5.1: Emmagatzematge geològic profund.

És important entendre com funcionaria l'emmagatzematge geològic profund, en el seu complet, a llarg termini. S'ha de considerar com la partícula d'aigua del medi geològic arriba fins al repositori, d'allí retorna al medi geològic i finalment a la biosfera. A efectes de funcionament, això suposa que una petita fracció de productes de fissió i alguns actínids s'alliberaran degut al contacte de partícules d'aigua amb el residu. A partir d'aquí, a conseqüència de la diferència de gradient químic, aquest radionucleid començarà a migrar cap a fora en un procés lent de difusió.

A més, és important tenir present que a l'hora de realitzar l'excavació per la ubicació de repositori s'ha de controlar de reduir al màxim la *Excavation Disturbed Zone* (EDZ), el qual depèn del tipus de medi geològic, ja que es pot convertir en un canal de migració de l'aigua i per tant, pel transport de radionucleids (Gens, A.). Aquest concepte es desenvoluparà més endavant quan es parli dels projectes més representatius en l'àrea de demostració.

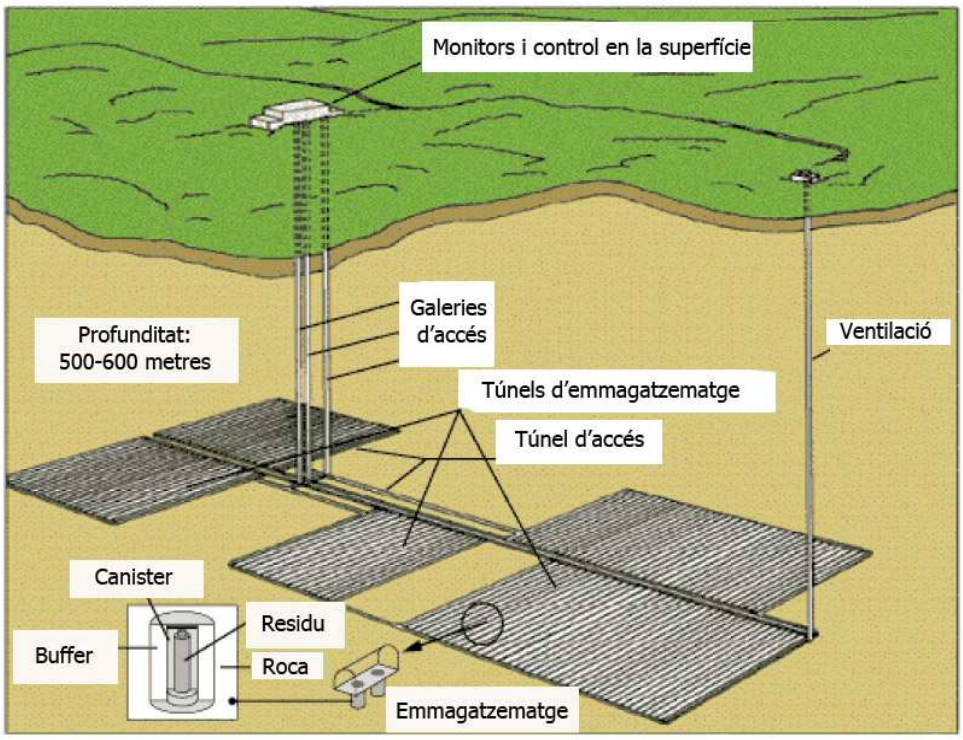

Fig. 5.2: Esquema d'un disseny per un emmagatzematge geològic profund.

El primer que es trobaran el radionucleids seran els productes degradats de la càpsula, una mescla d'òxids i hidròxids de ferro que es caracteritzen per tenir una elevada capacitat de reduir i una elevada capacitat de retenció. Amb això es vol dir que els radionucleids sensibles a oxidar-se o reduir-se, com els actínids, tendiran a tenir dificultats a l'hora de travessar la barrera. En el moment que el radionucleid arriba a la biosfera, es provoca una gran dilució i dispersió d'aquest.

Seguint les pautes donades en els paràgrafs superiors d'aquest punt, és important arribar a la conclusió de la importància que té la construcció de laboratoris subterranis, on a partir d'estudis a escala real i condicions reals, es pot obtenir dades específiques tant per ajustar el disseny d'un emmagatzematge geològic profund com per avaluar la seva seguretat. Tot i desenvolupar assajos de molts anys de duració, no s'acaba d'aconseguir unes condicions reals de l'escala temporal. Tot i així, el funcionament a llarg termini del sistema d'emmagatzematge de RAA, només es pot estimar a través de models matemàtics representatius d'un coneixement precís dels processos físics i químics, que es construeixen a partir de dades experimentals procedents de laboratoris convencionals, subterranis i estudis d'anàlegs i sistemes naturals.

En aquesta tesina només s'exposarà la importància i la connexió dels projectes més destacables en barreres argiloses, que es realitzen en laboratoris subterranis, per a la modelització del comportament HM, THM i en comportaments químics. Per a obtenir una bona comprensió entre els fenòmens termo-hidràulics i la resposta mecànica de la barrera el instrument essencial és el desenvolupament de formulacions acoblades que permetin la modelització

numèrica del problema real. Per tant, es considera que la modelització és un instrument clau en la gestió dels RAA.

S'ha de considerar que el transport dels radionucleids és absolutament diferent en argiles plàstiques que en argiles endurides. A diferència de les argiles plàstiques que tendiran a tancar les discontinuïtats que es produeixen durant la construcció, les argiles endurides com ara la que hi ha en el laboratori de Mt. Terri, poden mantenir les fractures obertes durant períodes de temps molt llargs (Barnichon y Volckaert, 2002). Tot i les diferències, les formacions argiloses tenen una permeabilitat molt baixa i unes característiques significatives en el retràs del transport dels radionucleids.

Com ja s'ha comentat, en la barrera de bentonita que s'instal·la entre la càpsula i la formació geològica on s'allotja, es produeixen uns fenòmens THM de gran intensitat degut a la combinació de processos d'escalfament i hidratació que es produeixen de forma simultània. A continuació es realitza una introducció dels comportament d'aquest processos per separat:

- El *comportament mecànic* de l'argila expansiva és el resultat de la interacció entre el canvi de volum dels agregats de partícules minerals i la reorganització espacial del material granular compactat a mesura que el material de la barrera argilosa es va hidratant. Aquesta interacció genera una expansió del material que pot donar lloc a canvis irreversibles i que modifiquen les propietats mecàniques. L'estat de confinament al que s'arriba permet el desenvolupament de pressions d'inflament que porten a un augment en les tensions de la barrera, les quals quan encara l'argila no està saturada augmenten la densitat de la barrera.

- El *comportament hidràulic* és el resultat de la resposta del material expansiu al flux d'aigua en condicions saturades i no saturades, en presència de gradients de potencial d'aigua.

- El *comportament tèrmic* és el resultat de la resposta del material al gradient tèrmic, establert per la generació de calor que produeix el residu radioactiu. Aquest calor origina un flux de calor per conducció a través de bentonita, que depèn de la conductivitat tèrmica. Per això, és diu que la conductivitat tèrmica de la barrera augmenta a mesura que aquesta es satura, afavorint la dissipació del calor.

L'acoblament entre aquests diferents comportament vénen produïts pels mecanismes creuats de transport. Així, el moviment de l'aigua líquida genera un transport advectiu de gas dissolt i de calor. Per una altra banda, els diferències de temperatura i la succió en la barrera creen gradients de concentració de vapor que originen un flux difusiu, on la seva magnitud està controlada per a porositat al gas depenen a la vegada de la saturació de la bentonita. Finalment, per efecte dels canvis de temperatura de la disminució del volum de porus accessibles pel gas i de la generació de gasos en la zona propera a la càpsula,

poden existir gradients de pressió que originen un flux de gas que transporta de forma advectiva tant vapor d'aigua com gas.

En conclusió, i per introduir els apartats que vénen a continuació, comentar que la bentonita, en condicions d'emmagatzematge definitiu de residus, està sotmesa a gradients termo-hidràulics que poden modificar les seves propietats físico-químiques, per tant es realitzen assajos específics termo-hidrogeoquímics com els que s'exposen a continuació segons els laboratori subterrani on s'ubiquen, que tenen como objectiu conèixer i avaluar les modificacions produïdes en la bentonita.

5.2. PROJECTES EN EL LABORATORI DE MONT TERRI

El laboratori de Mt. Terri s'ubica en el cantó suís del Jura, en un túnel que travessa una formació argilosa compacta, denominada Opalinus Clay (OPA). És un laboratori de segona generació, específicament dissenyats i construïts en una zona poc pertorbada.

Les organitzacions que actualment constitueixen el "Consorci Mt. Terri" són: el Servei Geològic Suís (SNHGS), ANDRA (França), BGR (Alemanya), IPSN (França), JNC (Japó), NAGRA (Suïssa), Obayashi (Japó), SCK-CEN (Bèlgica) i ENRESA (Espanya).

Les activitats en el laboratori de Mt. Terri van començar en 1996, i actualment està molt consolidat i té una gran flexibilitat per a dur a terme iniciatives tecnològiques i per l'adquisició d'informació sobre el funcionament d'argiles compactes. Els experiments es duen a terme en un túnel de reconeixement d'una autopista actualment en funcionament. La secció estratificada que talla el túnel inclou roques de l'edat del Triàsi-Juràsic, entre la que es troba la Opallinus Clay, d'edat Aaleniense superior (180-170 Ma), dipositada en un ambient marí somer. La OPA conté entre un 40-70% de minerals de l'argila (il·lita, interestratificats d'esmectita, kaolita i clorita), quars, carbonats, feldespat-k, pirita i carbó orgànic. Aquesta formació va ser enterrada gradualment per calcàries provocant la consolidació i compactació de l'argila aconseguint una densitat de 2'30 g/cm^3. Els paràmetres representatius de l'argila Opallinus es poden observar en la taula 5.1. on E és el mòdul de Young, υ és el coeficient de Poison, R_c és l'esforç de compressió uniaxial a compressió, m representa la forma geomètrica del material i el paràmetre χ es relaciona amb la quantitat de vinculació prenen valor 0 quan els enllaços de l'argila estan intactes.

E (Mpa)	υ	R_c (Mpa)	m	χ	r_0 (Mpa)	r_1 (Mpa)
7000	0'27	16	8	2	0'01	0'105

Taula 5.1: Paràmetres que s'utilitzen per caracteritzar l'argila Opallinus.

Els resultats de la modelització geoquímica en el laboratori de Mt. Terri (ENRESA, 2003), ha posat de manifest alguns problemes associats amb els mètodes utilitzats en l'obtenció de mostres d'aigua representatives de la formació geològica de baixa permeabilitat, com són:

- La pèrdua de CO_2 que provoca un augment en el pH de l'aigua recollida, això porta a dades errònies de la concentració de carbonat en l'aigua.
- L'oxidació de la pirita per $O_2(g)$ atmosfèric, el que provoca una acidifació del sistema, que es neutralitza per la dissolució dels carbonats.

Això comporta a una incertesa sobre els paràmetres involucrats en aquestes reaccions, com són l'alcalinitat i l'estat redox del sistema. Precisament aquest dos paràmetres són molt importants a l'hora d'avaluar el comportament d'un emmagatzematge de residus, ja que controlen la solubilitat dels radionucleids que es puguin alliberar. Però, amb la finalitat d'evitar aquests problemes, s'ha posat en marxa un experiment on una aigua de composició química teòricament semblant a l'aigua intersticial de la formació, es posa en contacte amb aquesta per mitjà d'un circuit tancat en l'interior d'un sondeig. D'aquesta manera s'evita el intercanvi de gasos amb l'atmosfera mentre l'aigua del circuit s'equilibra amb la formació.

En principi, l'aigua intersticial de la OPA està altament mineralitzada amb un total de sòlids dissolts de fins a 20 g/L. La composició química i les relacions isotòpiques de l'aigua en la OPA indiquen la presència d'una component significativa d'aigua des de fa milers d'anys. Els valors de Eh mitjos es troben sobre -0'2/-0'35 V (potencial redox, condicions oxidants).

Com ja s'ha introduït al principi d'aquest punt, la zona de EDZ són conseqüència de l'excavació dels túnels i les accions induïdes per un canvi d'humitat relativa en la superfície del túnel durant la seva ventilació, també per l'efecte d'expansió del medi i els canvis de la succió produïdes per la hidratació de la barrera de bentonita i de l'acció del sistema d'escalfament que simula els efectes del repositori. Per poder ajudar en la identificació d'aquests efectes, en el laboratori de M. Terri s'han dut a terme dos projectes representatius (Alonso, E.E. i altres, 2003), un d'ells és el HE(heating) i el EB (emplacement barrier). En el cas del model numèric del HE, es poden diferenciar diferents fenòmens durant les diverses etapes del projecte, com són: l'excavació del túnel, l'excavació de la galeria vertical de 300 metres per l'emplaçament de l'experiment, la hidratació de la barrera de bentonita, l'etapa d'escalfament fins als 100ºC i la corresponent etapa de refredament. I els fenòmens en l'experiment EB són: l'excavació de la galeria, la col·locació dels pellets de bentonita i la simulació de la hidratació. En els dos exercicis es modela una llei constitutiva mecànica, per les argiles, on s'hi pot integrar les característiques més importants dels materials com la seva degradació elàstica durant els efectes de carga i sequedat, el comportament fràgil durant l'excavació (EDZ).

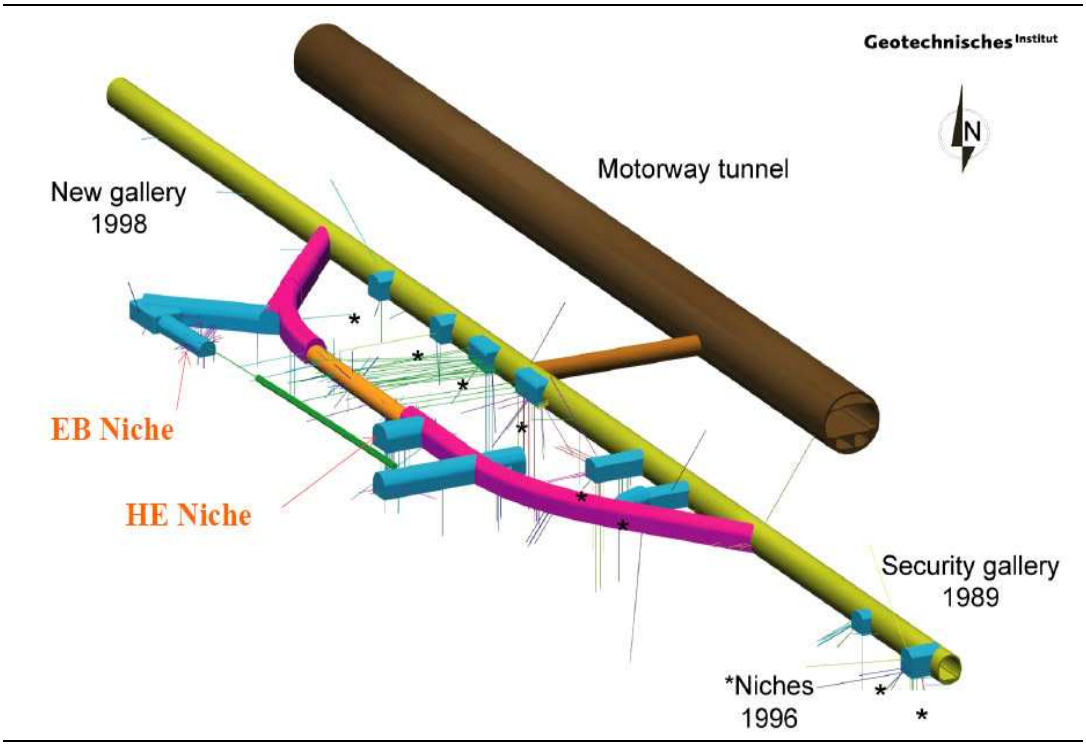

Fig. 5.3: Visió 3D del laboratori subterrani de Mont Terri.

5.2.1. PROJECTE HE

Aquest projecte, com ja s'ha introduït anteriorment, examina la resposta de la roca de Mont Terri davant d'un escalfament induït en un tram d'un sondeig vertical d'un model a escala d'un emmagatzematge definitiu de residus. Entre el calefactor i la roca es va introduir un anell de bentonita compactada. S'hi ha efectuat experiments de compressió uniaxial, retenció d'aigua, dilatació tèrmica i permeabilitat en condicions edomètriques i triaxials. Amb l'ajuda de piezòmetres i extensòmetres s'ha proporcionat les dades sobre el comportament de la roca durant les etapes d'excavació, hidratació de la bentonita i el seu escalfament.

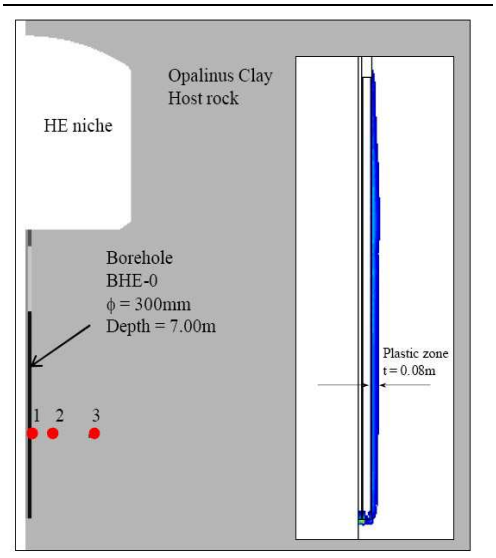

Fig. 5.4: Geometria del projecte HE.

El seu objectiu és identificar i mesurar la resposta THM en el buffer bentonític i la roca argilosa, davant la càrrega tèrmica induïda pels residus d'un emmagatzematge en aquesta formació . Per això s'hi ha instal·lat un radiadors dins d'un sondeig de 7 metres de longitud i 300 mil·límetres de diàmetre (borehole, BHE-0), col·locats en la ja anomenada barrera de blocs de bentonita compactats i la roca. En principi l'experiment es col·loca en 5'4 metres d'ample i 4'7 metres d'alt (Fig.5.4). En l'eix de perforació del BHE-O es col·loca un tub de calefacció (heating tub) d'uns 100 mm de diàmetre exterior. A partir dels 4 metres de profunditat fins als 6 metres, es col·loca un escalfador (heater) de 75 mm de diàmetre i 2 metres de longitud dins del tub de calefacció. En la peça externa del tub de calefacció es va instal·lar un filtres cilíndrics de ceràmica per accelerar la hidratació de la bentonita. L'espai que queda entre la roca i els filtres es va omplir amb blocs compactats de bentonita (gruix de 0'10 metres) a partir de la profunditat de 2 metres fins a 7 metres (Fig.5.5 i Fig.5.6).

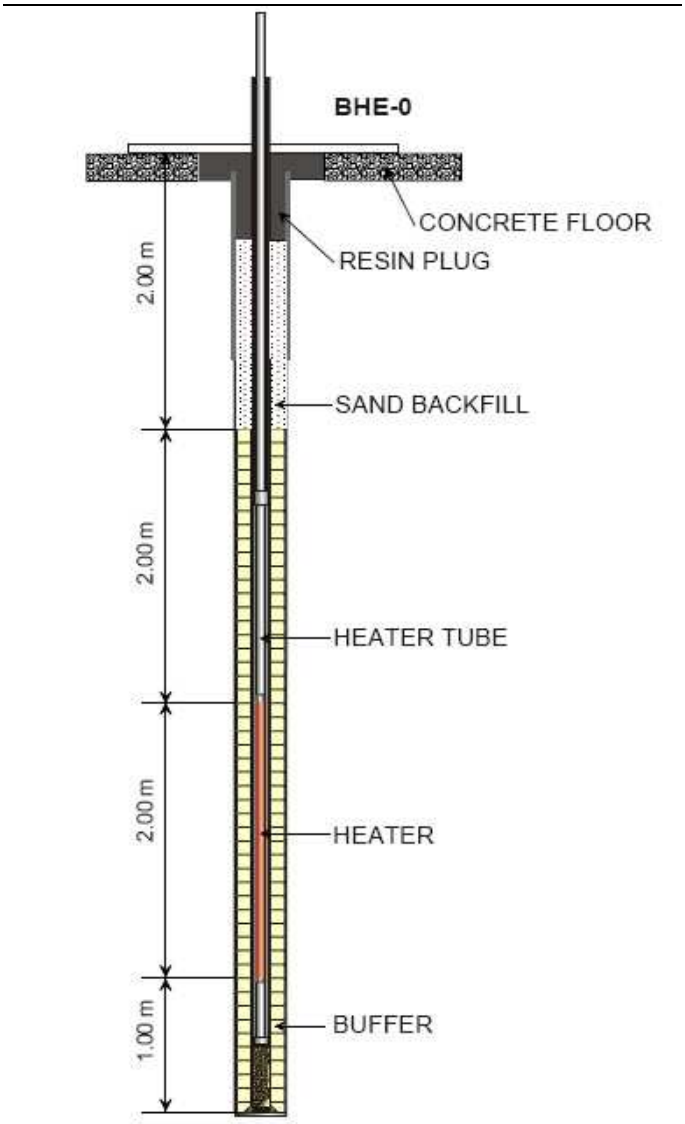

Fig. 5.5: Secció vertical de la perforació BHE-O amb tots els components de l'experiment.

La resta de la perforació, des de la profunditat de 0'4 a 2 metres, es va omplir amb arena seca i la part superior de la perforació (0 a 0'4 metres) va ser segellada amb resina per evitar filtracions d'aigua i de gas.

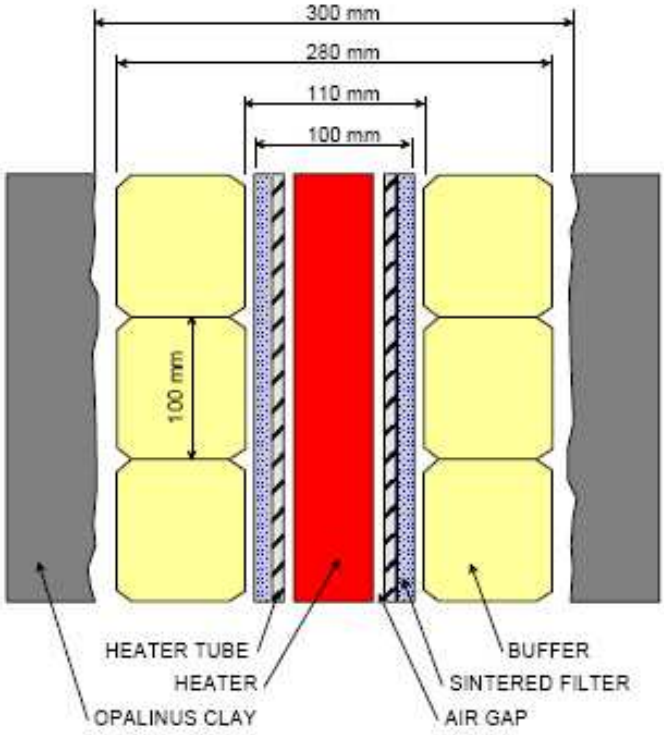

Fig. 5.6: Detall dels components de l'experiment.

En aquesta zona escasseja l'aigua, la barrera s'hidrata artificialment utilitzant una aigua de composició equivalent a l'existent en la formació. Al voltant del sondeig principal (BHE-O) s'hi ha realitzat sondejos auxiliars d'observació (BHE-1 a la BHE-20), en els que s'ha instal·lat diferents instruments de mesura de paràmetres tèrmics, hidràulics i mecànics. D'aquesta manera es poden supervisar paràmetres com per exemple la temperatura, la pressió i deformació radial de l'aigua del porus, de la roca (Fig.5.8).

La seqüència d'operacions que es van realitzar són:

- Durant 420 dies es va realitzar l'excavació per la ubicació del projecte HE, aplicant una humitat relativa del 95% (equivalent a una succió de 6'8 MPa) en la superfície interna. Durant 10 dies es va perforar el BHE-O mantenint el 95% de la humitat en la part interior de la paret. Es van provar el sistema d'escalfament i d'hidratació sobre els blocs de bentonita i en un principi es va detectar un grau inicial de saturació de 136'0 MPa. Aquest valor inicial de la succió, considerat alt, produeix un procés transitori de dessaturació en una peça anular de la roca amb un gruix de 0'7 metres aproximadament. Aquesta primera fase va durar 982 dies, i la hidratació es va realitzar a les profunditats de -6.90 m, -5.60 m, -4.40 m y -3.00 m.

- Al final de l'anterior període es va aplicar una fase d'escalfament fins aconseguir una temperatura de 100ºC en contacte entre l'escalfador i la bentonita i es prolonga fins la fase de refredament, que es va prolongar 540 dies. Aquesta fase d'escalfament es va posar en marxar quan la bentonita estava totalment saturada, aplicant per passos energies de 140W, 150W, 285W i 580W des de l'eix de l'escalfador fins al contacte esclafador i la bentonita.
- Després de 18 mesos d'escalfament es va para el sistema d'energia elèctric i es va restablir les condicions de temperatura inicial. Després de 25 dies de refredament, la temperatura decreix fins a 25ºC en la zona d'influència del projecte. El camp de tensions es simula amb una tensió vertical de 6 MPa i una tensió horitzontal de 4'8 MPa, i la representació de la distribució hidrostàtica inicial de la pressió d'aigua. En la figura 5.11a es pot observar l'evolució del temps de la temperatura registrada durant la fase d'escalfament. En el cas de la distribució de la temperatura en funció de la distància per diverses èpoques durant la fase d'escalfament es pot observar en la Fig.5.9.

Fig. 5.7: Activitat I+D en el laboratori de Mt. Terri en el projecte HE.

Com a resum dels valors mitjos dels desplaçaments radials durant la fase d'hidratació, la d'escalfament i la de refredament, es tracen en la Fig. 5.10. El valor mig màxim després de la calefacció correspon a 5'4 mm, mentre que els valors mitjos augmenten fins a 5'4 mm durant la fase de refredament.

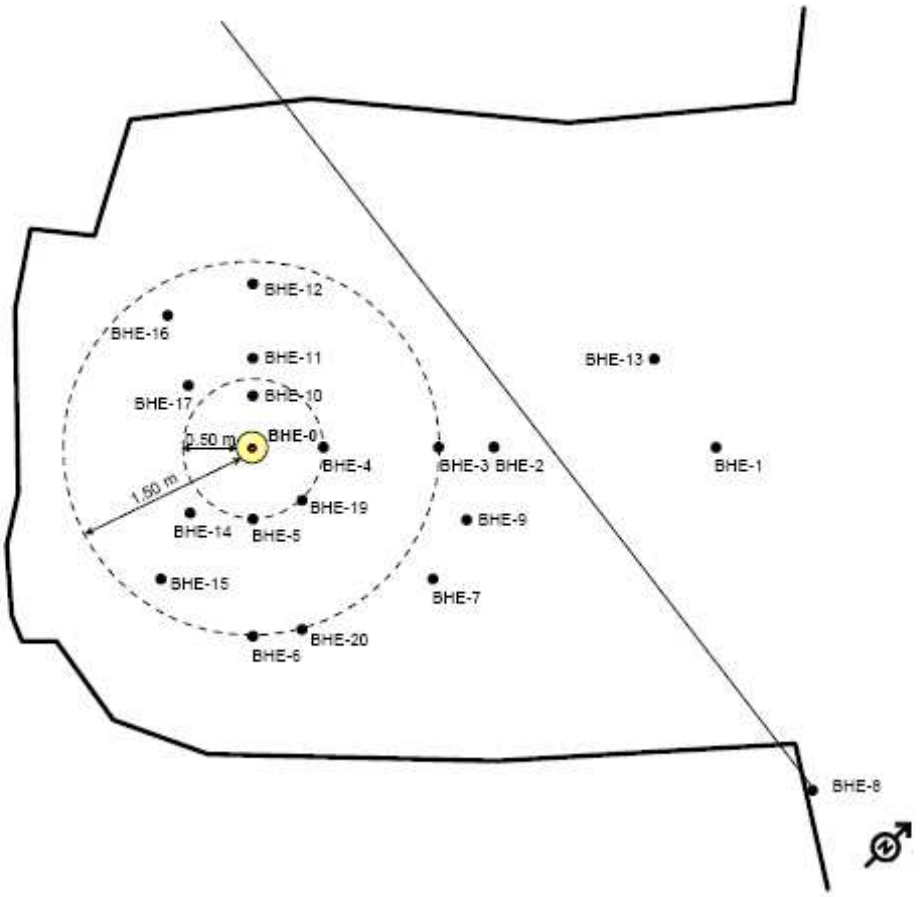

Fig. 5.8: Vista superior de la zona d'estudi del projecte HE amb les diferents perforacions d'instrumentació (Muñoz,J.J. 2006).

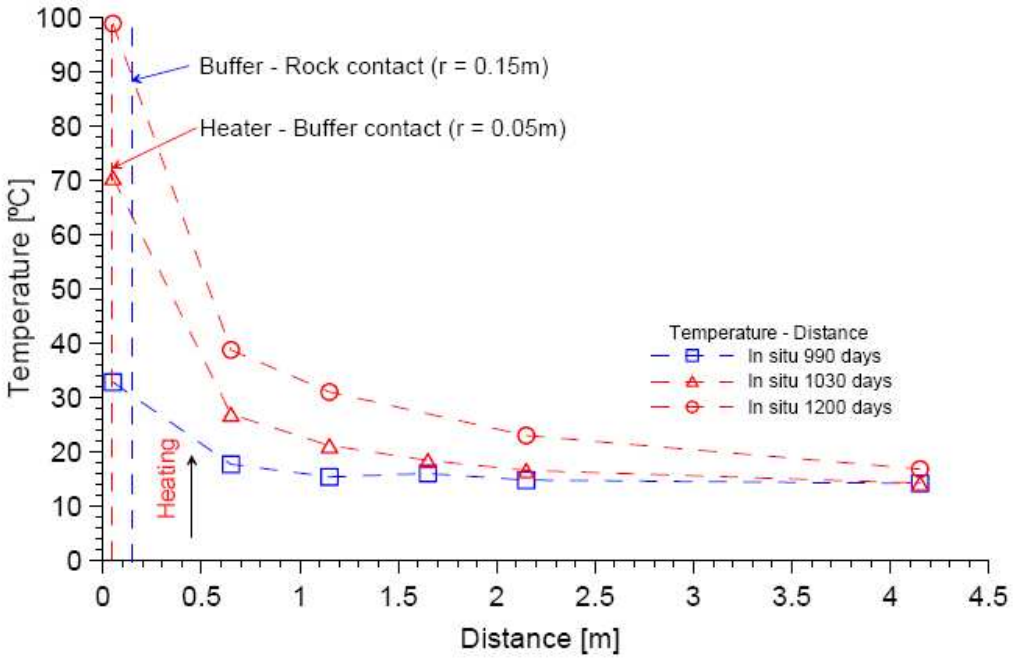

Fig. 5.9: Mesura de la distribució de la temperatura en funció de la distància en diferents punts de la fase d'escalfament (Muñoz, J.J. 2006).

La roca Opalinus Clay ha estat àmpliament caracteritzada, a una escala microestructura i macroestructura, mitjançant assajos de laboratori. Des del punt de vista de macroestructura, es pot obtenir la corba de retenció d'aigua, la conductivitat hidràulica, la seva resistència i deformació. I en l'anàlisi de la microestructura està enfocat a la caracterització mineralògica obtinguda per la difracció de rajos X, la distribució de la dimensió dels porus determinada per la porosimetria de mercuri (MIP) i la microscòpia electrònica (SEM).

Segons les gràfiques de la figura 5.11, on es representa l'evolució de la temperatura en funció del temps (a), de la pressió líquida (b), es representa també les tensions de la part radial en funció del temps (c) i les tensions circumferencials (d) en tres punts (indicats en la Fig. 5.4) situats a una profunditat de 5 metres des de la ubicació de la zona de projecte i en diferents distàncies radials des de l'eix de perforació. D'aquestes gràfiques, obtingudes mitjançant la modelització de l'experiment, es pot extreure, per exemple en el punt 1 a una distància radial de 0'15 metres coincidint amb la interfase bentonita-roca, la roca experimenta una dessaturació transitòria inicial seguida d'una fase de re-saturació induïda per la succió de la bentonita. Més tard, es desenvolupen com a reacció a l'escalfament que es produeix, unes pressions positives sobre els porus d'aigua que es dissipen i finalment, al refredar-se es produeix un equilibri final.

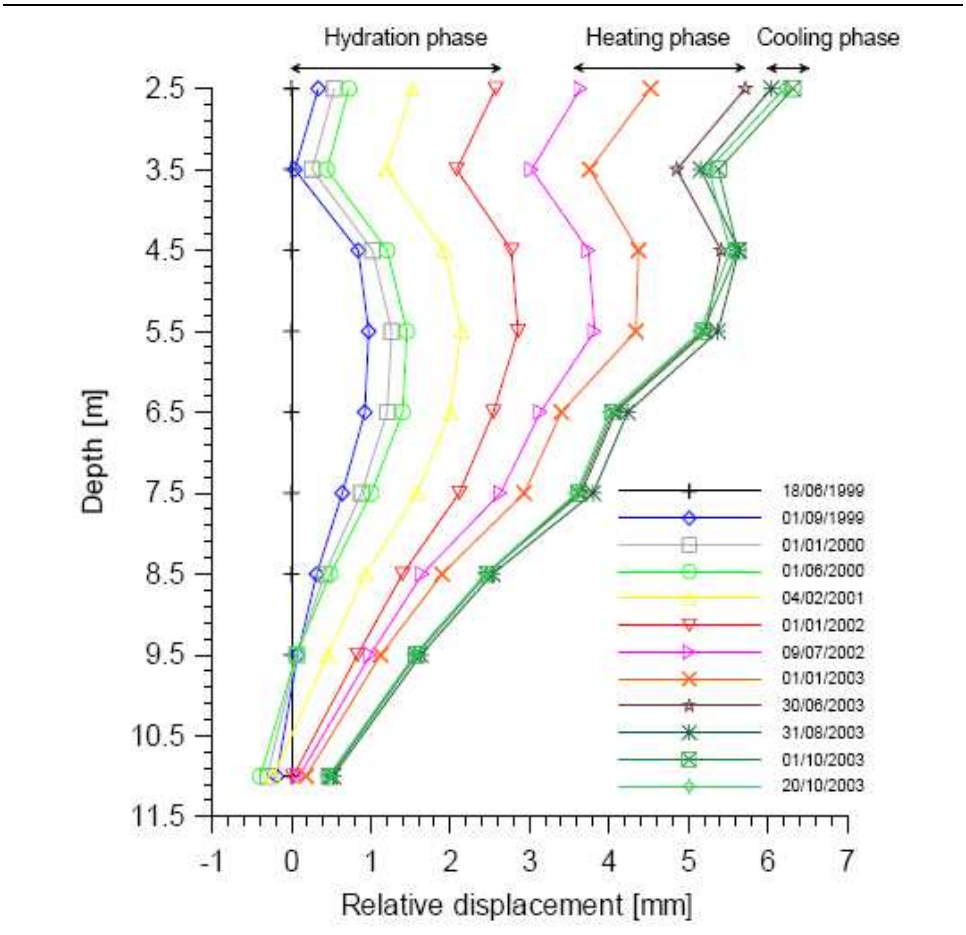

Fig. 5.10: Gràfic de la distribució de desplaçaments radials en relació amb la profunditat,en diferents moments de l'experiment (Muñoz, J.J. 2006).

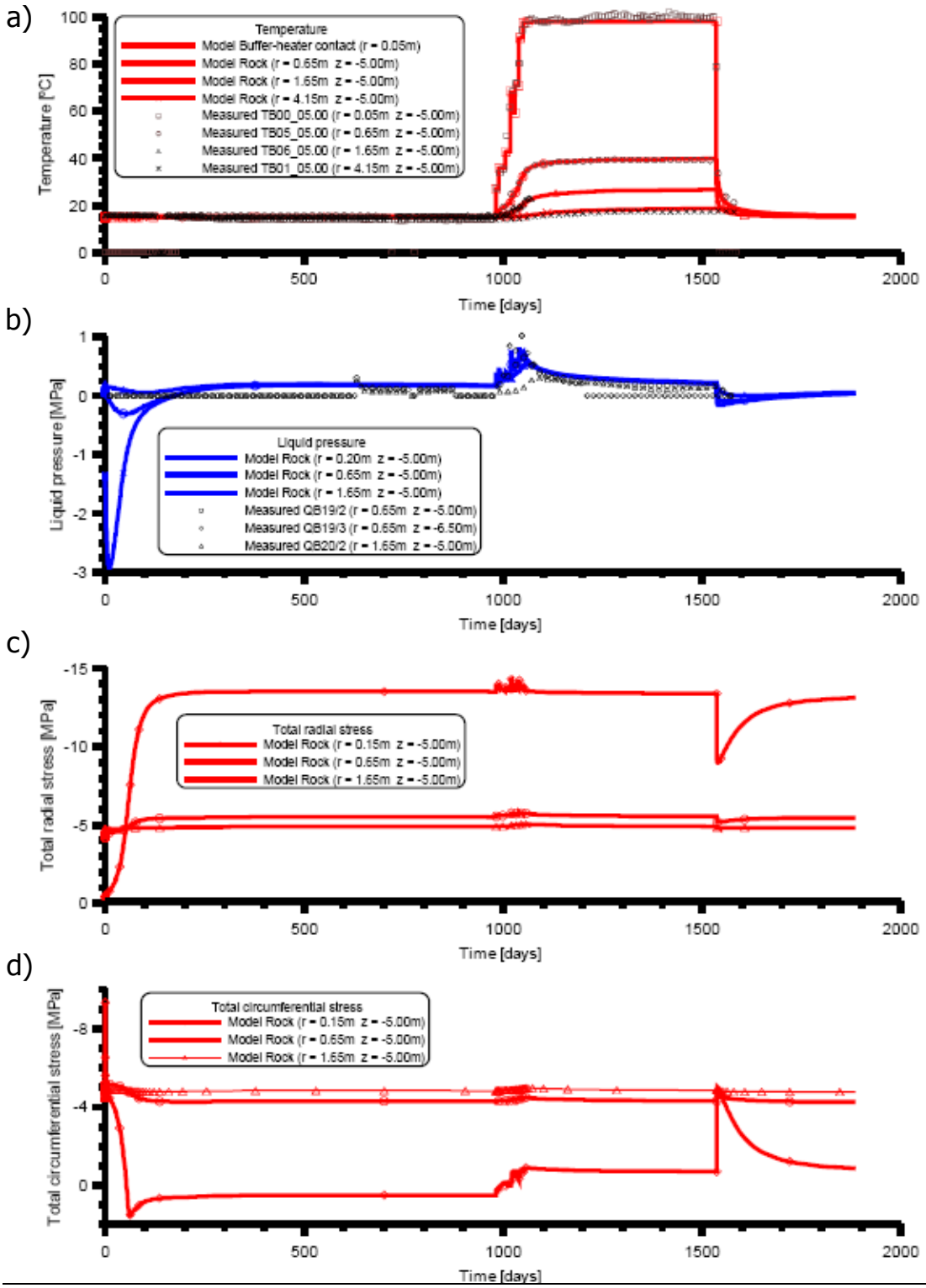

Fig. 5.11: Projecte HE. Evolució en el temps, a)de la temperatura. b)de la pressió líquida c)de la tensió radial total i d) de la tensió circumferencial total en tres punts situats a 5 metres de profunditat i a la distància radial de 0'15, 0'65 i 1'65 metres (Alonso, E.E. i d'altres, 2003).

El comportament THM de la roca argilosa es va analitzar amb un assaig in situ i amb probes de laboratori. Referent a l'anàlisi in situ, comentar que es realitza un estudi de la interacció entre la barrera d'enginyeria (blocs de bentonita compactada) i la barrera geològica (Opalinus clay), on una cèl·lula termo-hidràulica, dissenyada exclusivament, observa el comportament THM de la roca en condicions drenades i no drenades, a través de polsos de calor. Aquesta interacció, com ja s'ha comentat anteriorment, es complementa amb una simulació numèrica mitjançant el codi CODE BRIGHT. La fase d'excavació de la galeria per la realització del projecte HE i la ubicació del BHE-0, en la seva funció principal d'identificar la resposta THM, van ser realitzades per obtenir l'estat de tensions, les pressions d'aigua en els porus i els valors convenients de les temperatures properes a l'experiment.

Pel que fa a les probes de laboratori, sobre el comportament THM de la roca en condicions drenades i no drenades, comentar que la gran diferència sobre la permeabilitat en les dues condicions pot estar induïda per un canvi de la porositat macro produïda per la sequedat. Tot és degut perquè la roca durant la seva hidratació es produeixen dos fenòmens, on primer es redueix el gruix de les seves esquerdes quan la roca s'expandeix i seguidament mentre que en condicions drenades el flux passa pels plans de discontinuïtat més permeables (augmentant la permeabilitat precipitadament), en condicions no drenades aquestes esquerdes poden estar seques el que produeix que el flux es desplaci per la matriu de la roca, la qual té una capacitat més gran de retenció d'aigua.

En la modelització realitzada es reprodueix molt bé el fenomen de generació de pressions intersticials en la roca com a resposta a l'escalfament. En general, els càlculs dels desplaçaments que es reprodueixen són moviments petits (mil·límetres) i es preveu un fina zona danyada (EDZ) pròxima a la paret dels sondeig. A continuació, com a breu resum, s'exposen diferents resultats i comentaris sobre la modelització de les tres fases destacables (hidratació, escalfament i refredament) que es porten a terme en el projecte HE.

Com es pot observar en la Fig. 5.12, en la modelització de la fase final de la fase d'excavació de l'HE, les màximes deformacions verticals es produeixen en la corona de la zona de perforació amb 6'7 mm (en referència a l'eix de simetria), mentre que en la part inferior és de 1'6 mm. I com a deformació horitzontal destacable, la ubicada a mitja altura de la paret lateral, amb una deformació de 2'2 mm. Pel que fa a la modelització del grau de saturació, en la fase final d'excavació de l'HE (Fig. 5.13), cal destacar una zona no saturada al voltant de la paret de l'experiment amb un gruix de 1'5 metres, degut a l'evaporació de l'aigua en aquell zona (humitat relativa del 95%).

En un principi, en la fase d'hidratació, l'aigua entra en els filtres cilíndrics i es dirigeix cap a la zona on es troba l'arena i la satura ràpidament. Després d'això es satura la bentonita lentament. L'alta succió de la bentonita produeix una dessaturació de la roca circumdant en un gruix de 0'7 metres (Fig. 5.14).

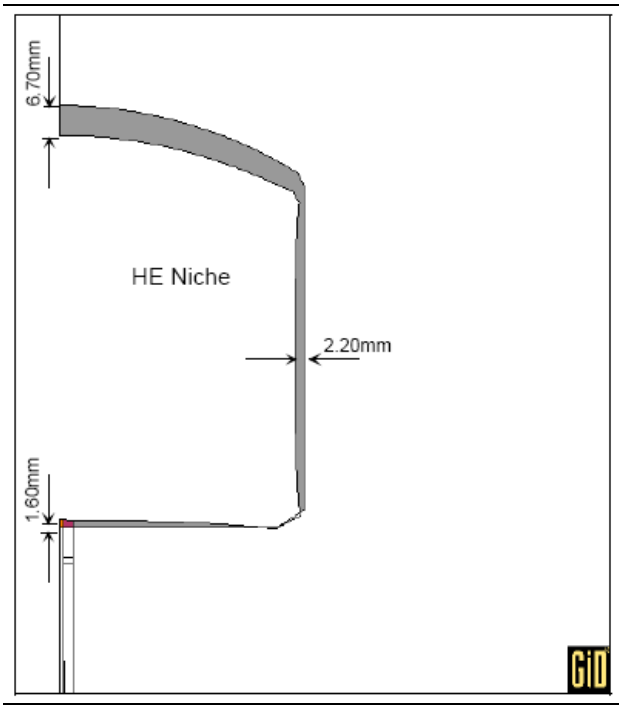

Fig. 5.12: Deformació de la zona d'ubicació de l'experiment HE, 420 dies després de l'excavació (Muñoz, J.J. 2006).

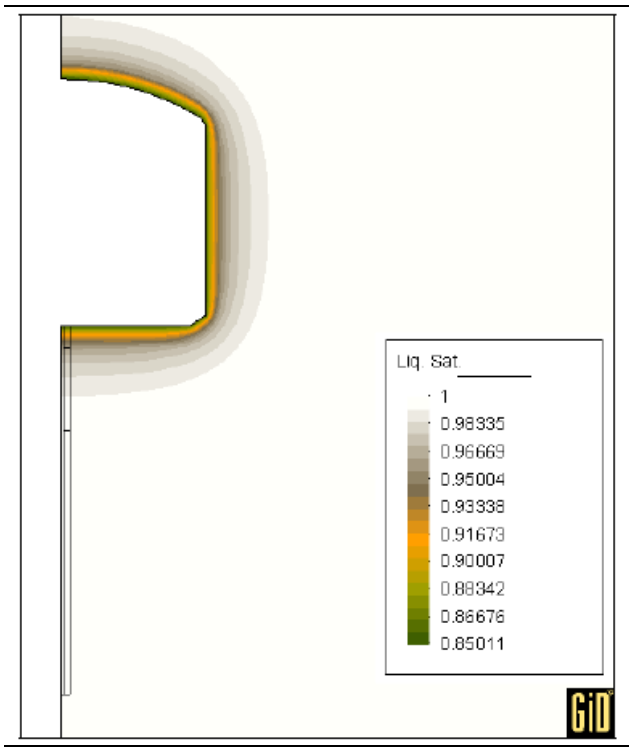

Fig. 5.13: Grau de saturació (Sr) al voltant de l'excavació del HE després de 420 dies (Muñoz, J.J. 2006).

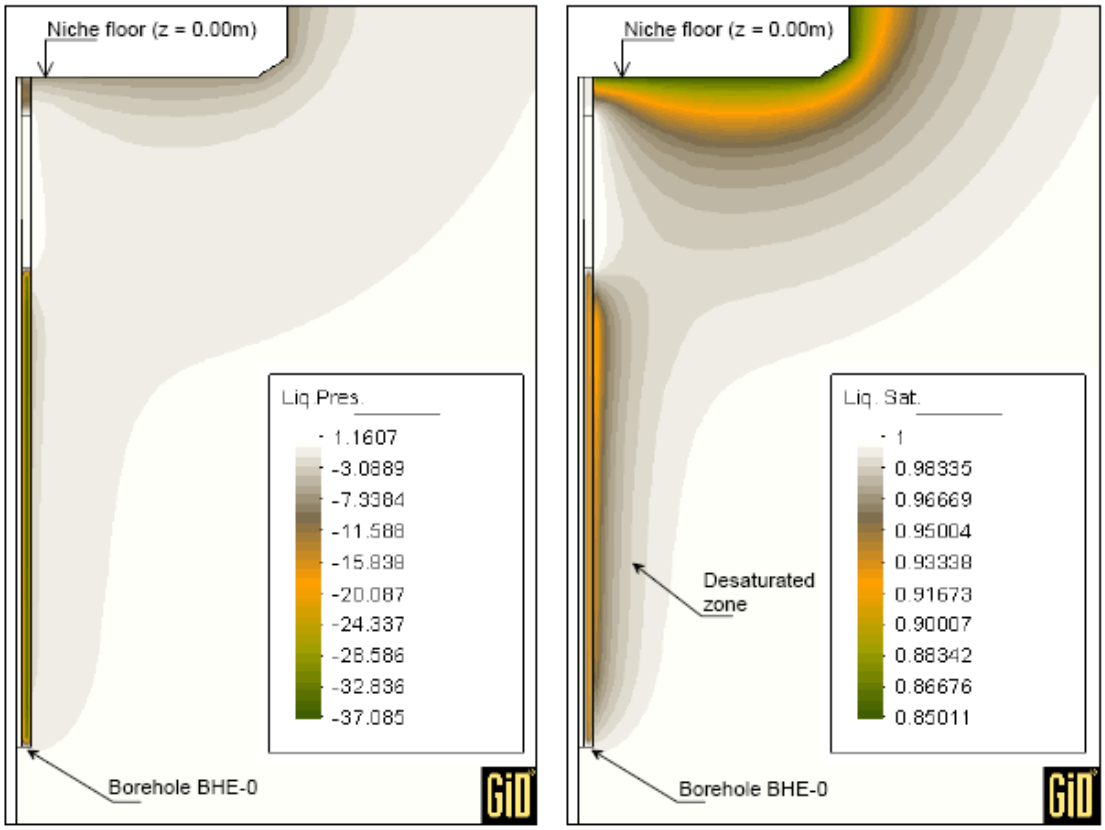

Fig. 5.14: (Dreta): Pressió líquida de saturació (MPa) després de 45 dies d'hidratació. (Esquerra): Grau de Saturació després de 45 dies d'hidratació (Muñoz, J.J. 2006).

La quantitat teòrica necessària per saturar la bentonita i l'arena era de 116'45 litres, i la calculada mitjançant el CODE-BRIGHT era de 150'5 litres, discrepaven de la injectada realment, 150'16 litres. La seva diferència, no molt gran entre la computada i la real, pot ser degut a fuites d'aigua en la injecció.

Entrant ja en els resultats aportats per la modelització de la fase d'escalfament, la qual com ja s'ha comentat anteriorment comença al dia 982 una vegada acabada la fase d'hidratació, es pot destacar que els increments de temperatura generen pressions positives d'aigua significatives (Fig. 5.11b). La magnitud del increment de la pressió de l'aigua està controlat per factors com l'índex d'augment de la temperatura, les oscil·lacions de la permeabilitat, la porositat de la roca, etc.

I per últim, la modelització de la fase de refredament de l'experiment, on la seva evolució es pot veure representada en la Fig. 5.11a. Cal destacar que a diferència de la fase anterior, aquí l refredar-se es tendeix a una pressió d'aigua negativa.

5.2.2. PROJECTE EB

El projecte anomenat Engineered Barrier Emplacement Experiment (EB), és un assaig de la barrera d'enginyeria i la seva interacció amb la roca del seu voltant, on es proposa un estudi d'un nou concepte d'emmagatzematge subterrani per residus radioactius de llarga activitat. El residu es disposa dins de contenidors metàl·lics allotjats en galeries horitzontals excavats en una roca argilosa (Opalinus clay-Laboratori subterrani de Mont Terri, Suïssa), i com a material aïllant s'utilitza una combinació de blocs i pellets de bentonita compactada (Bentonita Febex). Amb els blocs de bentonita es construeix una base que permet recolzar i posicionar les càpsules metàl·liques en el centre cadascun dels nínxols (es dipositen sobre un llit de formigó) i amb els pellets de bentonita compactada, que es col·loquen posteriorment en la part superior del reblert (Hoffman, C. 2005). Com antecedents del projecte ens trobem amb idees estudiades en altres projectes com el Projecte FEBEX (laboratori subterrani de Grimsel a Suïssa) gestionat per ENRESA (2000) i el projecte RESEAL (Laboratori subterrani de Mol a Bèlgica, 2000) gestionat per SCK-CEN.

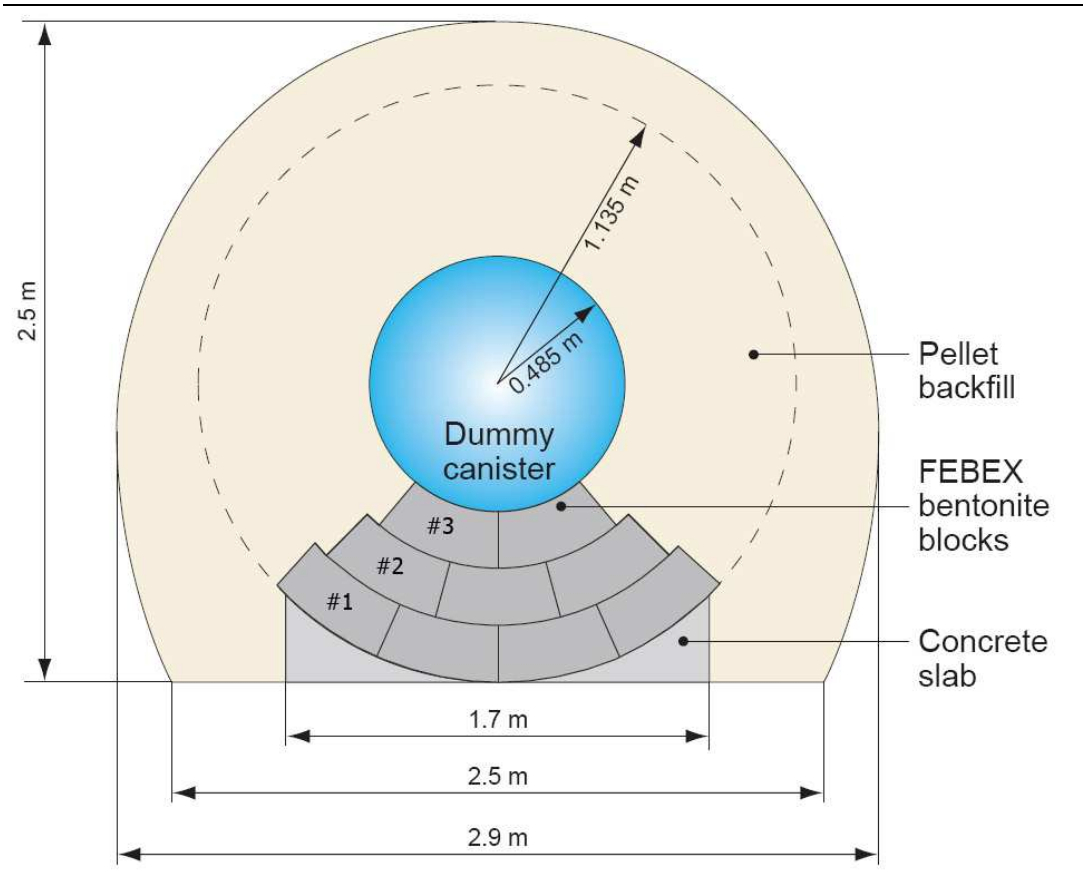

Fig. 5.15: Esquema proposat en el projecte EB (www.mont-terri.ch).

Es va excavar un túnel de secció en forma de ferradura de 15 metres de longitud (9 metres com àrea de servei i 6 metres de zona d'assaig), d'uns 3 metres d'ample i 2'65 metres d'alt (Fig.5.15) d'abril a juny de 2001. Per mitjà de mètodes geofísics i mesures hidràuliques es va detectar, in situ, que els valors mitjos de gruix dels danys produïts per l'excavació eren de 0'1 a 0'15

metres en el lateral del túnel i de 0'5 a 0'75 metres en la corona superior, amb valors màxim mitjos obtinguts de 0'3 i 0'6 metres respectivament com s'observa en la Fig. 5.16.

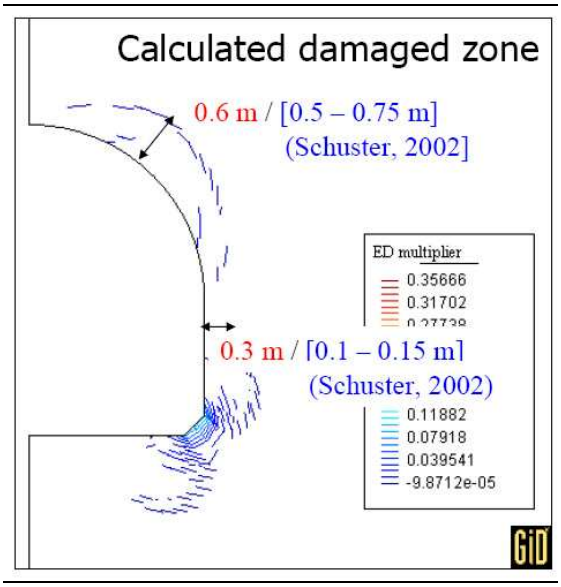

Fig. 5.16: Representació dels mètodes geofísics per obtenir les zones danyades per l'excavació (Alonso, E.E. i d'altres, 2003).

Si s'observa la representació de la gràfica de la Fig.5.17, es veu com en els deu primers dies l'efecte de l'evolució de danys després de l'excavació augmenta ràpidament en les diferents profunditats estudiades. Aquest efecte està associat al canvi en la succió de la roca. Poc a poc la intensitat del dany disminueix mentre que la distància a la paret exposada del túnel augmenta.

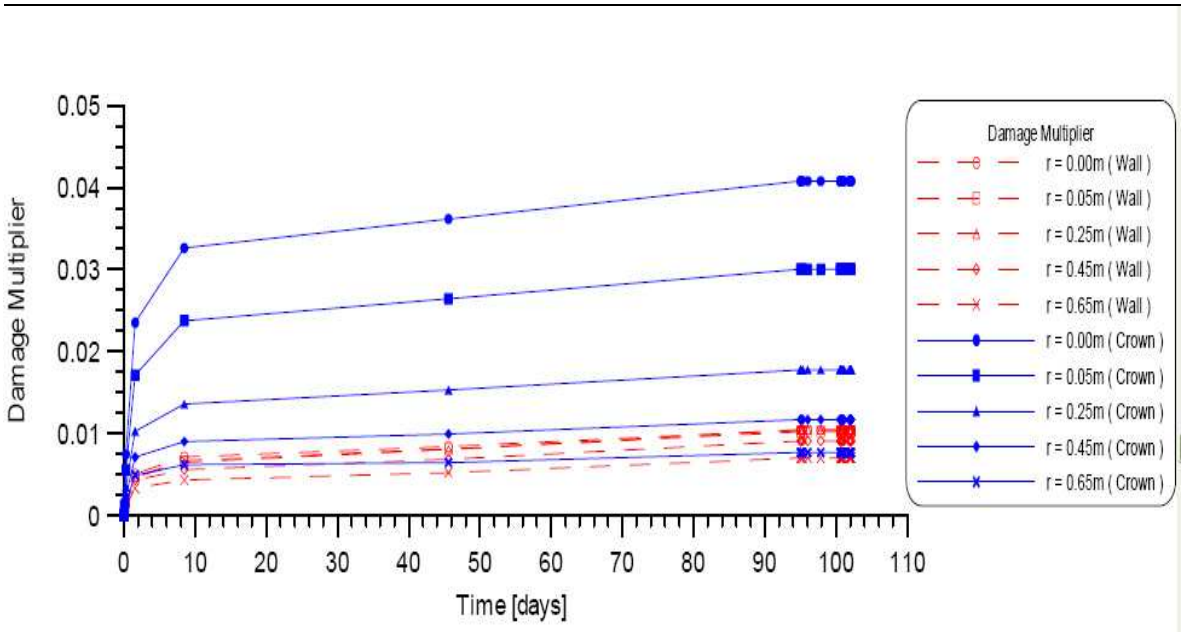

Fig. 5.17: Representació en el temps del multiplicador de danys en diverses profunditats en el lateral i en la zona superior (corona) del túnel on es realitza el projecte EB. Les línies continues representen els punts situats en la corona (a 0, 0'05, 0'25, 0'45 i 0'65 metre de profunditat). Els punts situats en la mateixa profunditat però en el lateral es representen en línies contínues (Alonso, E.E. i d'altres, 2003).

La col·locació dels blocs de bentonita, procedents de la bentonita FEBEX, es realitza en tres files (#1,#2 i #3) i les característiques i forma dels blocs es veu en la taula 5.2 i en la figura 5.18. La barrera de bentonita fa uns 66cm d'espessor amb un total de 36 blocs de bentonita necessaris per dur-la a terme. Pel que fa a la càpsula metàl·lica té una longitud de 4'54 metres i 0'97 metres de radi, i una densitat de 2'65 g/m^3.

Tipus de Bloc	a (mm)	b (mm)	c (mm)	Espessor (mm)	R (mm)	r(mm)	α(º)	Pes (kg)
#1	$470^{+2'0}_{-5'0}$	$380^{+2'0}_{-4'0}$	$214^{+2'0}_{-3'0}$	$125^{+2'0}_{-2'0}$	1'133	919	24	22'1
#2	$473^{+2'0}_{-5'0}$	$361^{+2'0}_{-4'0}$	$214^{+2'0}_{-3'0}$	$125^{+2'0}_{-2'0}$	917	703	30	21'8
#3	$478^{+2'0}_{-5'0}$	$300^{+2'0}_{-4'0}$	$214^{+2'0}_{-3'0}$	$125^{+2'0}_{-2'0}$	701	487	40	21'3

Taula 5.2: Característiques dels blocs de bentonita (FEBEX, 2005).

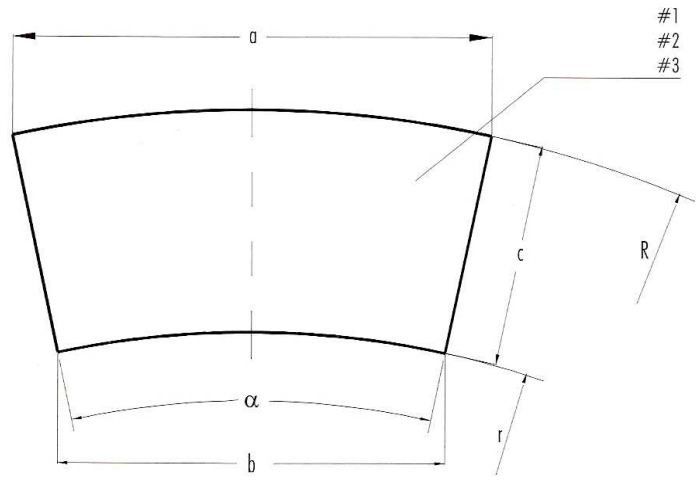

Fig. 5.18: Dimensions dels blocs de bentonita FEBEX.

Fig. 5.19: Sistema d'injecció d'aigua addicional en el projecte EB.

En principi el projecte EB es composa per una sèrie de feines que es poden agrupar en dos activitats fonamentals: la realització d'un assaig a escala real i la caracterització del comportament HM del material a partir d'un programa d'assajos de laboratori realitzat per la UPC. Les dues activitats convergeixen en la interpretació de l'assaig a escala real realitzat a partir de modelització numèrica.

Degut a la poca quantitat d'aigua disponible en la roca on s'allotja el dipòsit i per aconseguir la saturació de la barrera en temps raonables es va disposar d'un sistema d'injecció d'aigua addicional (Fig. 5.19). El sistema està format per dos tubs longitudinals connectats entre sí, a través dels quals s'injecta aigua des de l'exterior dels nínxols en condicions controlades (es controla la pressió i es mesura el volum d'aigua injectada). La utilització d'aquest sistema d'hidratació genera, durant el procés de saturació, diferents velocitats d'hidratació. Els porus grans situats a prop dels tubs d'injecció es saturen ràpid, per efecte d'inundació. Mentre que els porus més petits evolucionaran més lent i es saturaran segons un procés de difusió.

L'objectiu fonamental del projecte EB és demostrar la viabilitat de la utilització de pellets de bentonita compactada com a material per a la construcció d'un barrera d'enginyeria (Fig.5.20). A més la utilització d'aquest material està impulsada per la gran quantitat d'informació existent sobre la bentonita que composa els pellets (Bentonita Febex) i perquè té certes avantatges operatives i de funcionament per la barrera d'enginyeria:

- La possible mecanització de les operacions de transport i emplaçament del material utilitzant la tecnologia que prové del transport i manipulació dels grans. En principi els pellets es col·loquen en sec, seguint una corba granulomètrica òptima.
- És un material que es compacta per caiguda lliure i que no necessita la utilització d'una compactació mecànica, la qual podria danyar el contenidor metàl·lic on es diposita el residu.
- Permet aconseguir un millor contacte entre la càpsula metàl·lica amb el medi circumdant.
- S'obtenen millors reblerts en les irregularitats de les galeries d'emmagatzematge i una disminució de la presència de forats entre la part superior del reblert i la de l'excavació.

Paràmetres	Valors
Límit líquid w_L	93%
Límit plàstic w_P	47%
Part de material amb tamany < 75µm	85%
Part de material amb tamany < 2µm	65%
Contingut d'aigua hidroscòpic w	14%
Densitat del sòlida ρ_s (mg/m3)	2'70
Pressió mitja d'inflament amb una den. seca de 1'6 g/m3 (Mpa)	5
Cond. Hidràulica saturada mitja amb una den. seca de 1'6 g/m3 (m/s)	$4 \cdot 10^{-14}$
Contingut de monmorillonita	>90%

Taula 5.3: Característiques de la bentonita FEBEX.

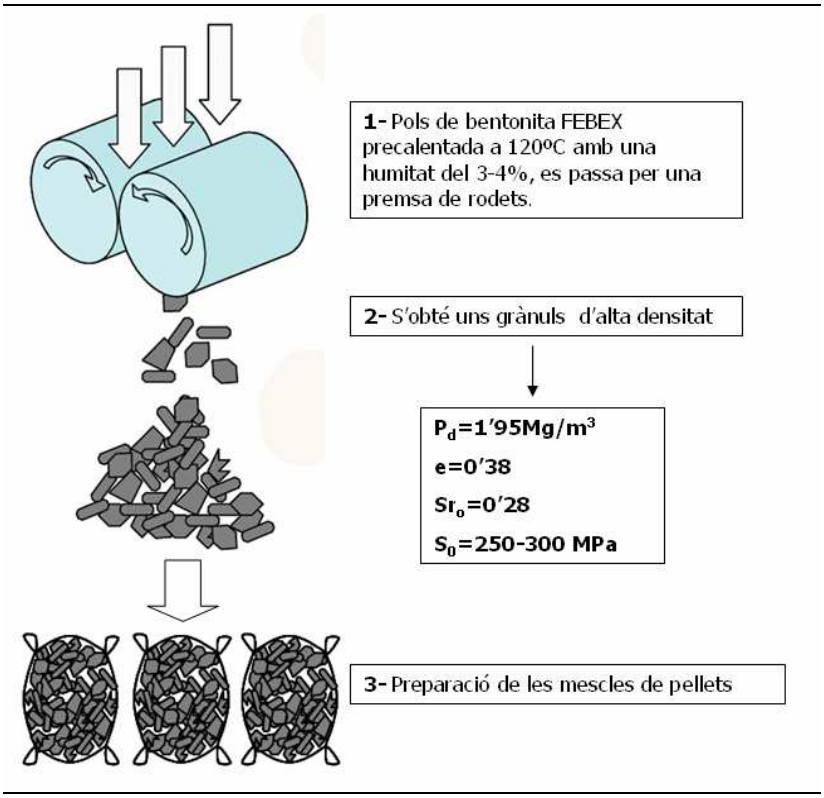

Fig. 5.20: Esquema del procés de fabricació dels pellets de bentonita.

Els pellets de bentonita utilitzats en el projecte EB, estan fabricats a partir de pols de bentonita FEBEX, la qual és una bentonita càlcica que prové del dipòsit del Cortijo de Archidona (ubicat en la zona de Serrata de Nijar al sud d'Almeria. Les propietats d'aquest material (Taula 5.3. i taula 5.4.), com es veurà en el següent punt, han estat estudiades en el projecte FEBEX (ENRESA, 2000) on es desenvolupen estudis sobre el comportament d'una barrera composta per blocs de bentonita compactada, com aïllament en un emmagatzematge subterrani de residus provinents de l'energia nuclear; per la caracterització tèrmica, mecànica, hidràulica i química del material.

Paràmetres	Valors
Densitat seca ρ_d (mg/m3)	1'95
Contingut d'aigua w(%)	3-4
Succió associada al contingut d'aigua (Mpa)	250-300
Índex de porus e	0'38
Grau de saturació inicial S_r	0'28
Densitat de sòlids ρ_s (mg/m3)	2'70

Taula 5.4: Característiques de les unitats granulars del pellets.

La dimensió, la forma i la distribució per dimensió dels porus són elements primordials en l'estructura interna d'un sol. La conductivitat està molt condicionada per la forma i dimensió dels porus. I en el cas de la deformació i el canvi de volum del sòl estan directament relacionats amb l'espai disponible entre partícules, ja que aquestes es desplacen i s'acomoden. Per aquets motius

és important l'estudi de l'estructura interna d'un material, la determinació del volum, la dimensió i forma dels porus, així com la seva evolució i canvi davant d'accions externes.

L'estudi de l'estructura interna dels pellets a partir d'assajos d'observació mitjançant un microscopi d'electrons (ESEM) o per d'intrusió de mercuri (MIP), els quals són una gran eina de treball a l'hora d'identificar els diferents mecanismes interns de canvi de volum que succeeixen en el material. En el cas dels processos mecànics (compactació) es produeix una reducció de buits associats a la reducció dels buits entre pellets i durant la trajectòria hidràulica (humitejament) s'observa l'aparició d'un tipus de porus associat al increment del volum dels grànuls d'alta densitat.

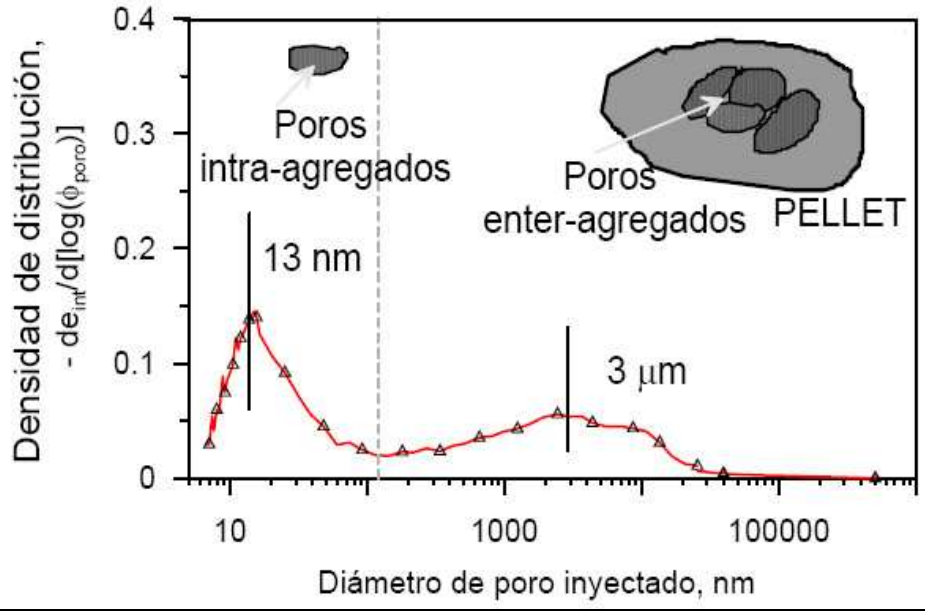

Fig. 5.21: Resultats obtinguts en un assaig d'intrusió d mercuri sobre un pellet (Hoffman, C. 2005) .

Segons s'observa en la corba de la figura 5.21, existeixen dos grups de porus amb dimensions característiques de 13nm i 3 μm, uns que pertanyen als agregats de partícules d'argila (intra-agregats o macroestructura) i els altres als agregats de partícules de minerals d'argila respectivament (entre-agregats o microestructura). D'aquests resultats es dedueix que tot i la forta compactació aplicada durant el procés de fabricació dels grànuls de bentonita, no s'acaba de fondre els agregats de partícules d'argila i es manté la distribució bimodal. En el cas de les mostres preparades sense la utilització d'una compactació mecànica addicional, o sigui compactació per gravetat, mostren una corba de distribució de porus trimodal on s'hi diferencia tres grups (Fig. 5.22). Un d'ells correspon als porus entre pelles amb una dimensió promig de 250 μm i dos grups de porus ubicats dins del pellet. Porus entre-agregats de partícules d'argila i porus intra-agregats, amb dimensions característiques de 3 μm i 13nm respectivament.

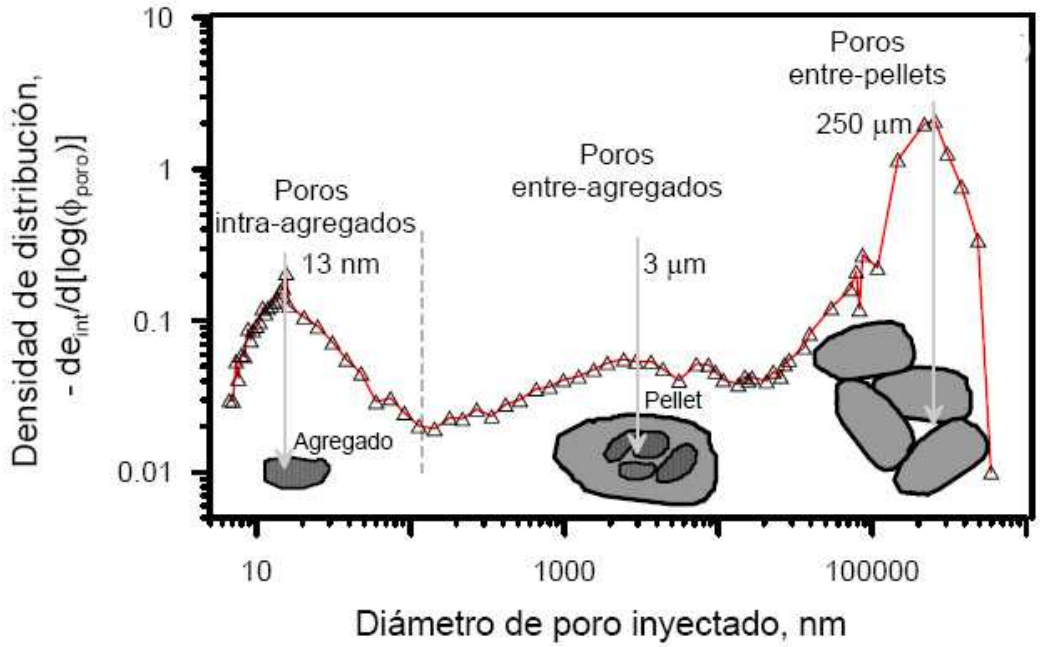

Fig. 5.22: Assaig d'intrusió de mercuri sobre una mostra de pellet sense compactació (Hoffman, C. 2005) .

Segons l'objectiu establert pel disseny d'una mescla òptima pels pellets i a partir de resultats obtinguts en assajos, es descarta la fracció de material menor a 0'4mm degut als següents factors de decisió:

- Per evitar la segregació del material fi que s'observa en el procés de preparació del material.
- S'observa una major velocitat d'intercanvi d'aigua en el medi ambient amb fraccions fines del material.
- S'ha d'aconseguir obtenir un material amb l'estructura interna més oberta i amb una major interconnexió dels porus entre els pellets.
- El valor final de la pressió d'inflament no es veu afectada per la granulometria, sinó que depèn de la densitat seca de la mescla.

Durant el programa experimental es van utilitzar dimensions de material de 4, 10 i 15 mm, amb mostres d'altura 20, 50 i 100 respectivament. Les corbes granulomètriques corresponents a cadascuna de les fraccions es mostra en la figura 5.23.

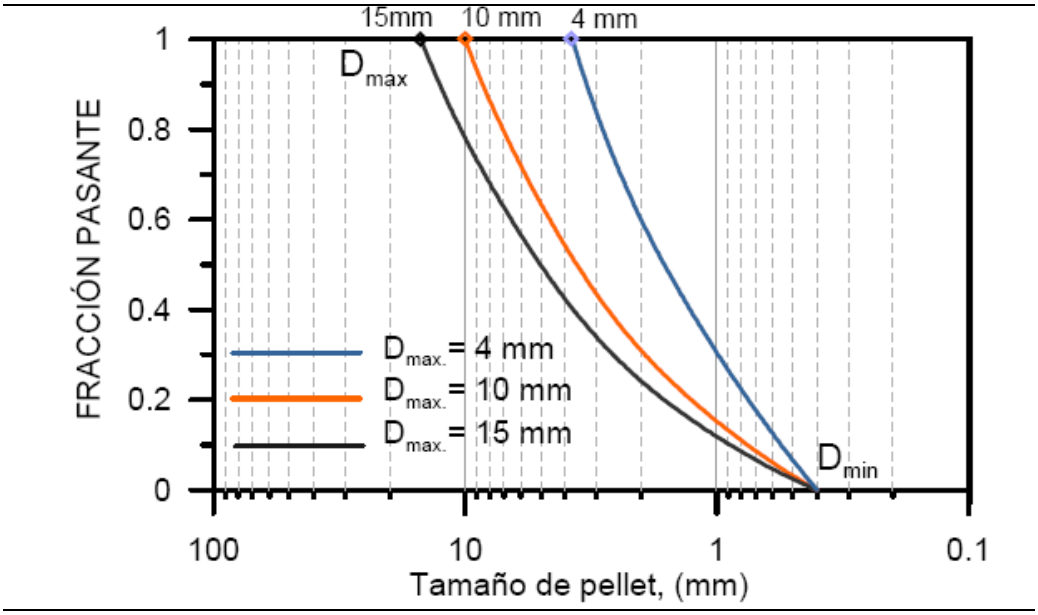

Fig. 5.23: Corbes granulomètriques òptimes per fraccions màximes de pellets de 4, 10 i 15mm (Hoffman, C. 2005) .

Es pot assegurar que els processos de compactació utilitzats provoquen una reducció dels buits corresponents als buits entre pellets i afecten a l'estructura interna dels pellets. Durant el procés d'estudi de reducció de buits o compactació i interpretant les corbes de distribució de porus obtingudes a diferents nivells de compactació, es poden diferenciar dos etapes:

- En la primera etapa actuen conjuntament els mecanismes de reordenació de pellets i ruptura o "crushing" dels pellets, fins assolir una valor de densitat seca de 1'70mg/m^3. En aquest cas la corba de distribució de porus sofreix una translació des de valors de porus més grans fins a valors menors (Fig. 5.24a).
- En la segona etapa, la densitat seca oscil·la entre 1'70 mg/m^3 fins a 1'95 mg/m^3 i apareix un procés de deformació dels grans ja trencats produint-se una coalescència de porus, que provoca un canvi en la forma de la corba de distribució de porus on s'hi observa una reducció i aixafament de corba corresponent als porus de major dimensió (Fig. 5.24b).

Existeixen nombrosos estudis sobre el comportament HM dels materials argilosos i expansius en condicions no saturades que mereixen especial atenció. Per exemple els treballs experimentals realitzats per Romero (1999), que aporta informació sobre equips, tècniques experimentals, sistemes de control i procediments d'assaig utilitzats en la caracterització termo-hidro-mecànica d'un material argilós (argila de Boom, laboratori de Mol a Bèlgica). També fer referència als treballs realitzats per Barrera (2002) i Mata (2003), que són de gran utilitat per a la caracterització HM sobre llims argilosos i mescles de granit amb bentonita.

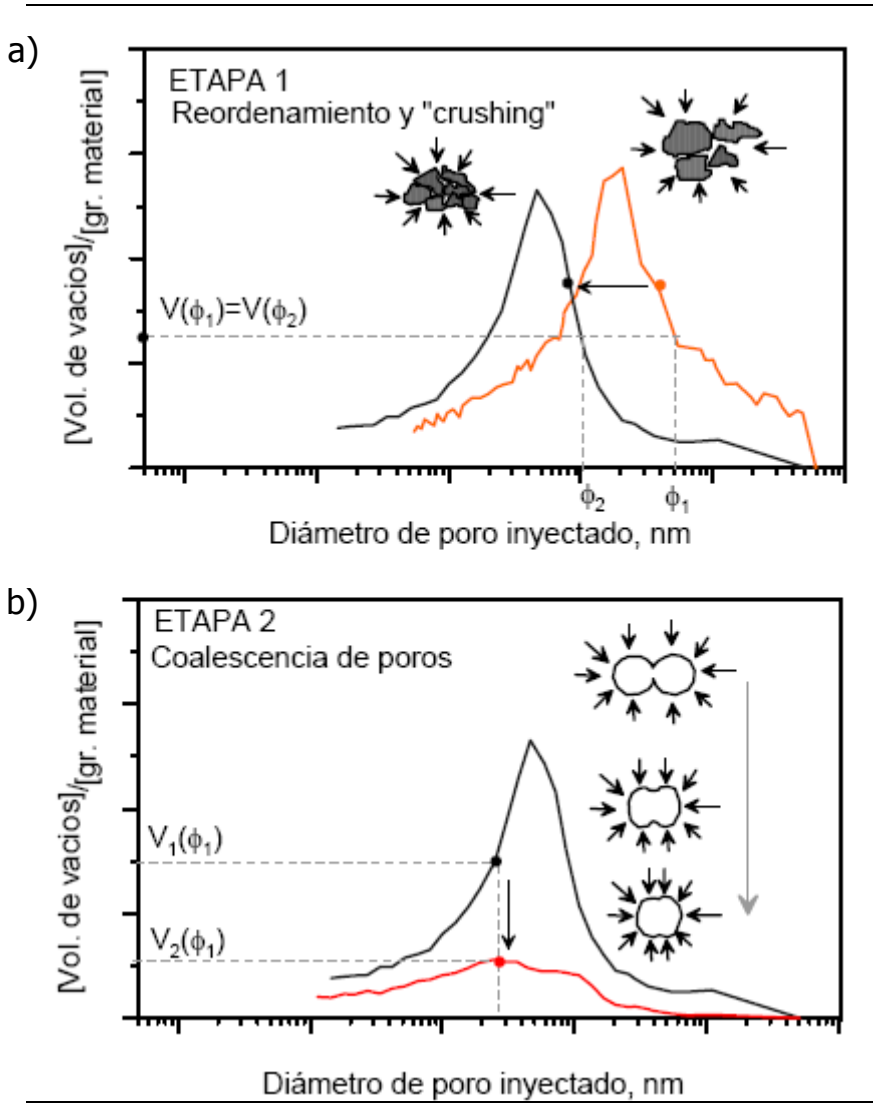

Fig. 5.24: Mecanismes de compactació. a)efecte del mecanisme de reordenació i "crushing" o ruptura de pellets en la corba de distribució de porus. B)mecanisme de coalescència de porus (Hoffman, C. 2005) .

Com ja s'ha introduït la bentonita és un material caracteritzat per la seva baixa permeabilitat i amb un gran potencial expansiu, el que comporta que els assajos de laboratori siguin una llarga duració i que l'equipament a utilitzar sigui molt específic per poder aplicar grans esforços i pressions d'aigua. En aquest cas, i degut a la gran similitud entre els materials utilitzats en els dos estudis, pel desenvolupament d'aquesta tesina es consideren i es tenen presents els resultats obtinguts en el projecte FEBEX (ENRESA, 2000) i en la tesis doctoral de Villar (2000).

A més, com a referència específica sobre els processos de fabricació de pellets i sobre el comportament HM del material d'argila en forma de pellets es destaca els treballs realitzats per NAGRA (2001) i també pels resultats obtinguts sobre l'estudi de l'evolució de la deformació volumètrica a llarg dels cicles de mullat i secat sobre les mostres formades per pellets d'argila de Boom.

Quan es parla de l'aplicació de les diferents tècniques de succió directament s'està introduint el concepte de succió del sòl i les seves components que el determinen. En la realitat, es pot trobar aigua emmagatzemada o retinguda pel el sòl davant d'esforços gravitacionals per sobre el nivell freàtic, ja que el moviment de l'aigua no està governat únicament per les forces gravitatòries i el nivell freàtic no determina un límit físic per a la presència d'aigua. Per tant, és el concepte de la succió és el que ens permet explicar la capacitat de retenir aigua d'un sòl, així com la major o menor facilitat per mobilitzar una certa quantitat d'aigua dins el sòl. La succió es relaciona amb la humitat relativa (HR), introduint d'aquesta manera el concepte de succió total (ψ), formada principalment per una component de succió matricial, que va associada a les forces capil·lars existents en el sòl, i una osmòtica que dóna a conèixer l'efecte de canvi d'HR provocat per la composició química de l'aigua, ja que normalment l'aigua en un sòl no és pura, sinó que conté sals dissoltes.

Deixant de banda la definició del concepte succió queda endinsar-se una mica més en el corresponent aquesta tesina, fent referència a que per controlar la succió d'un sòl s'utilitzen en el laboratori les tècniques de translació d'eixos i de transferència de vapor i que per mesurar la succió s'utilitza un psicròmetre de transistors. A més, degut al sistema d'hidratació artificial en el procés d'hidratació de la barrera estudiada en els assajos a escala real, comentat anteriorment; es produeixen diferents cinemàtiques d'hidratació el que fa necessari adaptar els equips del laboratori i els sistemes de mesura convencionals per poder utilitzar diferents tècniques de transferència d'aigua i aplicar diferents velocitats d'humitat. En definitiva, per caracteritzar el comportament hidràulic del material es realitzen tres tipus d'assajos diferents: assajos de permeabilitat saturada, assajos d'infiltració i assajos de corbes de retenció.

Per poder contrarestar els resultats obtinguts en els assajos en el laboratori, es va dur a terme una sèrie d'assajos a mitjana escala (assaig de columna d'infiltració), on es va estudiar la resposta del material en condicions similars a les existents a escala real.

Per acabar amb l'exposició dels conceptes generals sobre el projecte EB, quedaria introduir una sèrie de conclusions que fan efectiu aquest projecte i el treball que l'engloba, des del punt de vista de la metodologia de treball i els resultats experimentals en laboratori obtinguts:

- Com a resultat del procés de fabricació del les mescles de pellets de bentonita s'obté un material granular format per unes unitats d'alta densitat seca ($\rho_d = 1'95\,\text{mg/m}^3$) i un baix contingut d'aigua (3-4%). El valor de la succió mitjà sobre les mostres fabricades utilitzant mescles de pellers preparades a diferents valors de densitat seca varia entre 250-300 MPa.
- Per poder investigar el comportament de material i controlar la succió durant el procés d'hidratació és necessari utilitzar de forma combinada

diferents tècniques experimentals. Una d'elles, la tècnica de transferència de vapor, mitjançant dessecadors i humidificants amb valors de succió entre 300 i 3 MPa. I l'altra la tècnica de translació d'eixos amb una transferència de líquid per valors de succió entre 3 MPa i la saturació.

- L'estudi de l'estructura interna del material es realitza fonamentalment amb l'assaig MIP, que a la vegada ha estat de gran utilitat en la identificació dels diferents mecanismes de canvi de volum. Per tant, un augment de la carga produeix una reducció dels buits associats a la reducció de buits entre pellets. Per a mostres amb una densitat inferior a 1'5mg/m^3, el mecanisme predominant és la reordenació del grans, mentre que per densitats superiors a 1'5 mg/m^3, es produeix una ruptura important de partícules amb un desplaçament de la dimensió de porus a valors inferiors (Fig. 5.24).
- Un augment en el nivell de carga aplicada produeix una disminució del volum associat a la reducció de buits entre pellets, deixant als porus dins els pellets quasi intactes. Per una altra banda, un augment en el contingut d'aigua produeix un augment del volum de la mostra associat a l'aparició d'un nou conjunt de porus que correspon amb la porositat intra pellet.
- Durant l'estudi de l'evolució de la permeabilitat mitjançant assajos d'infiltració, es va observar que la resposta del material està caracteritzada per l'existència de dos etapes amb comportaments realment diferents. Una etapa inicial, on l'aigua entra en la mostra a través de la porositat entre pellets i en la que es registren valors de permeabilitat característics dels materials granulars. I en la segona etapa, els pellets de bentonita comencen a expandir-se i hidratar-se envaint la porositat entre pellets. Aquest fet posa de manifest la importància que té l'estructura interna del material.

Deixant de banda els resultats obtinguts en el laboratori, comentar que en abril de 2002, es van col·locar 40'2 tones de material bentonític i un volum de 28'4 m^3, en la galeria on es duen a terme els assajos a escala real del projecte EB. Es va observar que la bentonita tenia un 4'2% de contingut d'aigua i una densitat seca de 1'36 g/cm^3, una mica inferior al valor obtingut en el laboratori, potser causat pel flux d'aigua produït pel sistema d'hidratació artificial. A més, a uns 50cm de la paret de la galeria es detectava una permeabilitat entre $5 \cdot 10^{-12}$ i $1 \cdot 10^{-11}$ m/s molt inferior a la detectada en octubre de 2001 ($5 \cdot 10^{-11}$ i $6 \cdot 10^{-11}$ m/s). Aquesta disminució de la permeabilitat del EDZ després de la resaturació, també es veu reflexada en el projecte HE en Mont Terri.

Durant 18 mesos (el 6 de maig del 2002 a l'octubre de 2003), després de segellar la galeria, es va dur a terme el procés d'hidratació artificial de la galeria amb un total de 15'2 m^3 d'aigua injectada. S'ha de puntualitzar que l'estimació realitzada sobre el volum d'aire abans d'iniciar la injecció era de 12'5 m^3, això fa pensar que part de l'aigua injectada s'infiltra pel massís rocós o bé que la densitat de l'aigua intersticial de la bentonita és més gran que la unitat (ENRESA, 2005). Els sensors (hidròmetres) instal·lats en la barrera d'enginyeria i en el massís d'argila, mostraven que es trobava en condicions saturades. Un

dels sensors situats a 3 metres de profunditat mostrava un valor de 1'2MPa, mentre que els altres 6 (ubicats en profunditats entre 0'3 a 1'5 metres) valors propers a 0'1MPa. La informació provinent dels extensòmetres donava uns desplaçaments molt petits al voltant de la roca en la zona d'estudi, menys d'2mm. Per una altra banda, els desplaçaments de la capsula metàl·lica són més grans, del valor de 14mm.

Segons les mesures geofísiques sobre l'evolució de la zona EDZ durant la saturació, es pot concloure en que els paràmetres són molt semblants als indicats anteriorment, quan la roca estava intacta.

Després d'haver donat quatre pinzellades sobre la realització de l'assaig a escala real i la caracterització del comportament HM del material a partir d'un programa d'assajos de laboratori sobre el projecte EB, queda indicar els estudis i desenvolupaments que s'han dut a terme en el desmantellament del projecte EB. Però abans destacar els fets més emblemàtics que s'han produït en el desenvolupament del projecte EB:

- La supervisió de l'evolució de la barrera d'argila en aquests dos últims anys (abans del desmantellament previst en setembre del 2006), van demostrar un desenvolupament progressiu de les tensions internes i de la humitat relativa, que van fer suposar que la barrera d'argila estava essencialment saturada. Però el fet que les tensions no estaven estabilitzades, va suggerir que els processos d'hidratació encara estaven en marxa.

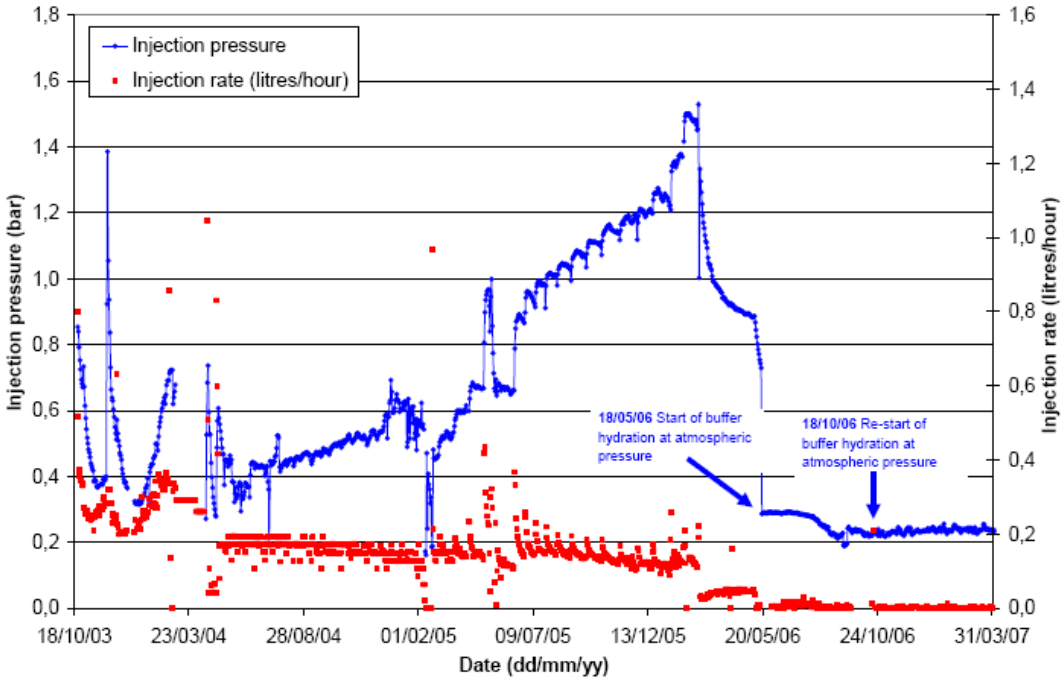

Fig. 5.25: Representació de l'evolució temporal de la tarifa de la injecció d'aigua en relació amb la pressió d'injecció. El preu per hora mig durant el període de gener a març de 2007 (del di 1706 al dia 1795) es trobava en 0'003 litres hora, amb un valor de 0'006 l/h en el període anterior (Aitemin, 2007).

- A finals de setembre del 2005 s'havia injectat un volum total de 18'4 m^3 d'aigua, molt superior al valor indicat anteriorment sobre el volum d'aire estimat en la barrera d'argila (Fig. 5.25). En principi, amb l'experiment EB és una bona oportunitat per millorar la modelització sobre el comportament de la bentonita en aquest aspecte.

5.3. PROJECTE EN EL LABORATORI DE GRIMSEL. PROJECTE FEBEX

El laboratori subterrani de Grimsel, denominat en anglès "Grimsel Test Site" (GTS), està ubicat en els Alps suïssos a 1730 metres d'altitud, a uns 450 metres de profunditat sota el Juchlistock, en una formació de granit i granodiorita molt afectat per varies fractures, en la part central del país. Es va excavar aprofitant els accessos subterranis existents en una central hidroelèctrica. El GTS es operat per NAGRA, l'Agència Suïssa de Gestió de Residus Radioactius, a través d'acords establerts amb la companyia elèctrica propietat de la central.

Aquest laboratori subterrani s'enllaça amb el Pas Grimsel per una petita carretera i un túnel d'accés horitzontal de 1'2 Km de longitud. A partir d'aquest túnel, NAGRA disposa d'una sèrie de galeries i cavernes experimentals amb una longitud total de quasi bé 1000 metres que, junt amb la zona de serveis generals i infraestructura, constitueixen el GTS (Fig. 5.26).

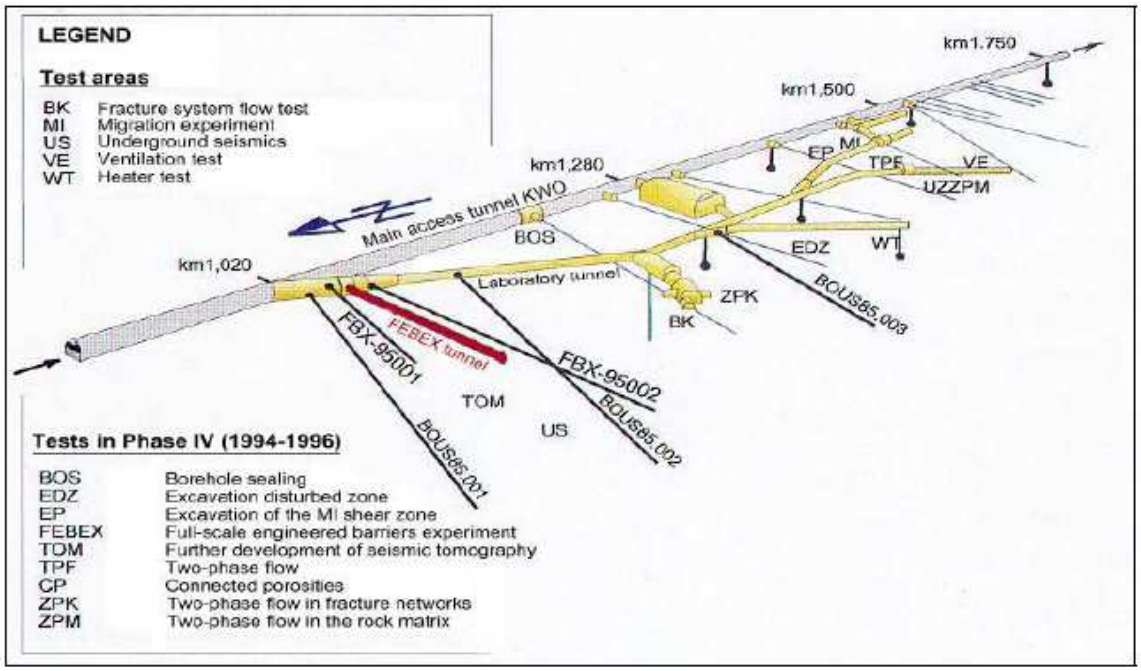

Fig. 5.26: Localització dels assajos realitzats en el GTS.

El projecte FEBEX (Full Scale Engineered Barrier Experiment in crystalline host rock) és un projecte internacional liderat per ENRESA i finançat per CE. En aquest projecte es proposa la construcció d'un depòsit en profunditat realitzat en una formació granítica, mitjançant un emmagatzematge amb galeries horitzontals i amb una barrera aïllant amb blocs de bentonita compactada. Aquest projecte consta d'un assaig in situ que es dur a terme en el laboratori de Grimsel i un assaig en maqueta, que es realitza en el CIEMAT (Espanya). Aquestes activitats es complementen amb un important programa d'assajos de laboratori, i un exercici de modelització i anàlisi dels resultats.

Els components físics de l'assaig de la maqueta, consisteixen en cinc unitats bàsiques: l'estructura de confinament amb el seu sistema d'hidratació, el sistema d'escalfament, la barrera d'argila, la instrumentació i els sistemes d'obtenció de dades i control.

L'objectiu d'aquest de FEBEX és observar el comportament THM de la barrera d'argila que es produeix per la combinació de processos d'escalfament i hidratació que es produeixen simultàniament. L'elevada activitat de les argiles utilitzades en la barrera implica un fort acoblament entre els fenòmens TH i la resposta mecànica de la barrera. Una bona compressió dels diferents fenòmens THM que tenen lloc en la barrera, així com les seves interaccions és necessari per assegurar un bon comportament i optimitzar el seu disseny. Per això s'hi ha instal·lat dins de la barrera de blocs de bentonita, tant en l'assaig de Grimsel com en la maqueta, un sistema d'escalfament que consisteix en dues fonts de calor situades dintre d'un folre d'acer col·locat concèntricament en la galeria cada 1'2 metres (amb una potència de 4.300 W per unitat) que simulen les càpsules de residus d'uns 4'5 metres de longitud, 0'9 metres de diàmetre, un gruix de 0'10 metres i 10'5 tones de pes. Les fonts de calor estan fetes d'acer de carboni i en principi el projecte s'ha dimensionat per mantenir una temperatura constant de 100ºC en el contacte amb la bentonita. Tot i la diferència d'escala entre els dos assajos que es duen a terme, en els dos s'hi ha col·locat un gran nombre d'instruments de mesura per observar l'evolució dels principals paràmetres del tipus THM en la barrera (un total de 632 sensors).

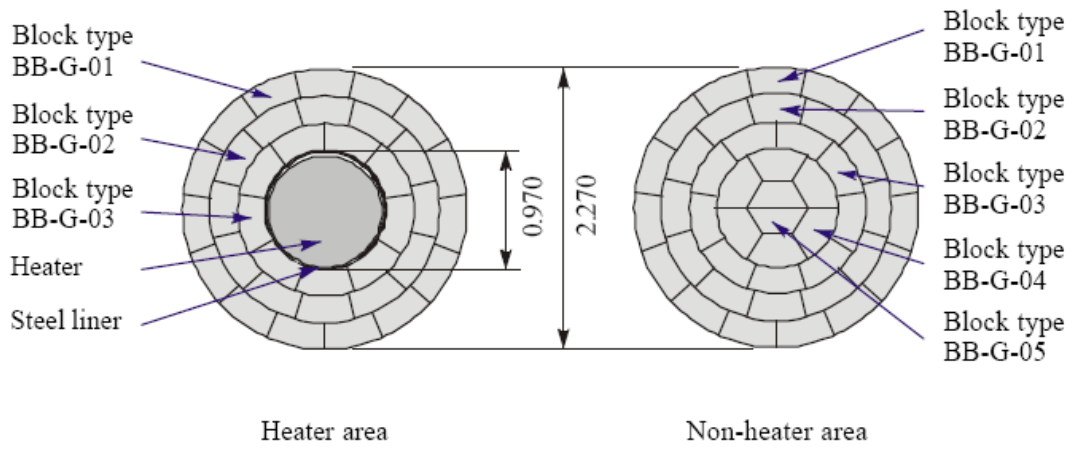

Fig. 5.27: Geometria the la barrera de bentonita en l'experiment FEBEX in situ, cotes en metres (CIEMAT, 2004a).

Les galeries excavades expressament tenen un diàmetre nominal de 2'28 metres, 70 metres de longitud, una pendent ascendent del 1% amb la finalitat d'evacuar per gravetat les aigües tant les que es produeixen durant l'obra com posteriorment durant l'execució de l'assaig, i una barrera de bentonita que rodeja aquesta galeria, formada de blocs de bentonita compactada procedent del jaciment Cortijo de Archidona, explotat per les mines de Gádor, S.A. en la zona de Serrata de Nijar (Almeria). Aquesta barrera suposa una massa de 115'7 tones de bentonita. Aquesta zona es segella amb un tap de formigó de 2'7 metres, que té la funció de suportar l'empenta produïda per l'expansió de la bentonita, que pot arribar a ser de l'ordre de 6 MPa. Els blocs de bentonita es fabriquen en diferents dimensions segons la seva col·locació i el seu pes es troba entre 18 i 23 kg (Fig. 5.27). En un principi es demana que la barrera de bentonita tingui una densitat seca mitja aproximadament de 1'60 g/cm^3. Els blocs fabricats tenen un contingut d'humitat del 14'4% i una densitat seca de 1'7 g/cm^3. El sistema de control i monitoratge va ser instal·lat en una zona anomenada àrea de servei, que es troba entre el tap de formigó i la galeria d'entrada (Fig. 5.28 i Fig. 5.29).

Fig. 5.28: Vista de la galeria. La imatge presenta l'àrea de servei, on arriben tots els cables provinents de la zona d'assaig. Al fons de la fotografia, es pot veure el tap de formigó.

El projecte FEBEX comença la seva fase d'escalfament en 1997, i oficialment el setembre del 2000 es dur a terme la segona fase, on degut a la gran expectació, conta amb un total de 23 socis de vuit països diferents. Un dels avantatges és que funciona de manera totalment automàtica, pel que es pot supervisar i governar a distància des de Madrid.

En aquest projecte s'inclou la realització d'un programa experimental per la caracterització del comportament THM dels blocs de bentonita i la realització d'assajos a escala real. La fabricació dels aproximadament 7.000 blocs de bentonita compactada d'uns 25 kg cadascun, amb una densitat seca de 1'70

g/cm^3 no va dur problemes, però si que s'ha de controlar el temps d'exposició al medi exterior perquè porta problemes amb la humitat de l'ambient. A l'hora de col·locar-los es va realitzar manualment i controlant el volum de porus que es va centrar en un 5% concentrar principalment en la corona de la galeria.

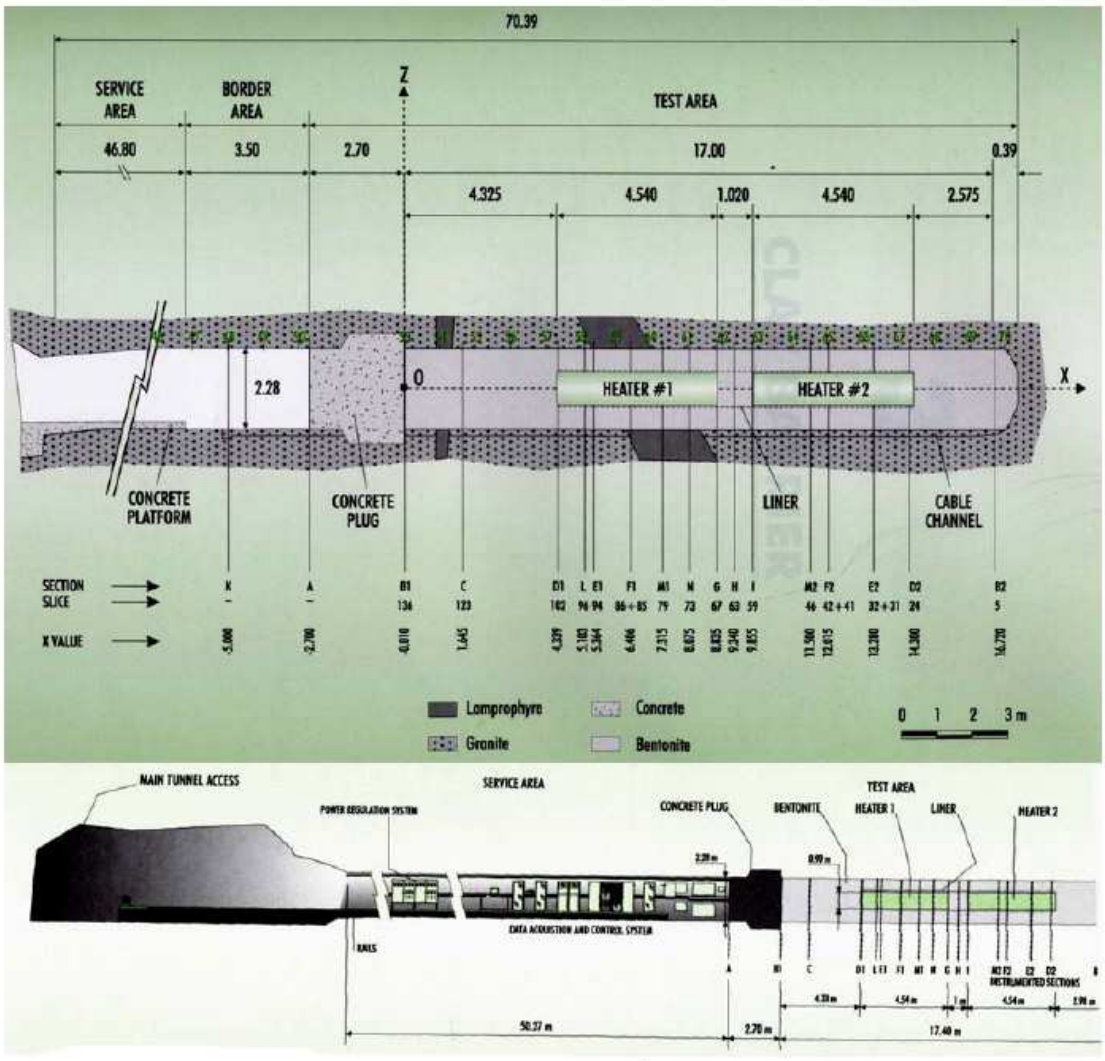

Fig. 5.29: Emplaçament i disseny dels components de l'assaig dintre de la galeria FEBEX. Sobre: Detall de la zona d'escalfament, emplaçament de la bentonita, el tap de formigó i les fonts de calor. Sota: Vista general de la galeria.

El treball de caracterització que s'ha realitzat en la bentonita del projecte FEBEX, no sols a permès obtenir una sèrie de paràmetres del material útils per la modelització, sinó que també s'han obtingut una sèrie de conclusions que permeten avançar en el comportament THM de les argiles compactades. Aquestes conclusions, de les que cal destacar la importància de la doble estructura, són les següents (ENRESA, 2003):

- La porosimetria per intrusió de mercuri permet constatar l'existència d'un doble estructura molt marcada en l'argila compactada. Quan la bentonita es compacta a les densitats seques utilitzades típicament en les barreres

d'enginyeria, el volum de porus de la microestructura supera clarament el de la macroestructura.

- Per obtenir corbes de retenció de materials és necessari posar en joc valors de succió molt alts (majors de 500 MPa), on la seva forma de la corba depèn de la densitat seca del material.
- La mesura de la permeabilitat al gas per diferents graus de saturació i de densitat, ha permès constatar l'enorme influència que té el grau d'hidratació de la bentonita en la seva permeabilitat intrínseca. Per un mateix volum de porus, aquesta permeabilitat pot arribar a canviar fins a 7 ordres de magnitud segons si el sòl està totalment hidratat o sec.
- L'elevat rang de pressions i de succions utilitzat en els assajos de tipus mecànic ha obligat a la posada a punt de nous equips i tècniques d'assaig. S'ha realitzat dos tipus d'assaig edomètric amb succió controlada:
    - Assaig amb trajectòries d'augment de carga i succió constant i de reducció de succió baix carga constant.
    - Assajos de pressió d'expansió amb control de succió.
- La pressió d'expansió disminueix a l'augmentar la temperatura, aquest comportament pot explicar tenint present els canvis que produeix la temperatura en el nivell microestructura i la reducció en la dimensió de la superfície de fluència de la macroestructura degut a l'augment de temperatura.
- Els assajos realitzats per estudiar l'efecte de la salinitat de l'aigua de la bentonita en el seu comportament mecànic han confirmat que l'existència de soluts disminueix la capacitat d'expansió de la bentonita.

A l'estiu del 2002 (després de 5 anys de funcionament) es va realitzar el desmantellament parcial de l'assaig, on es va extreure un dels radiadors i tota la barrera de bentonita corresponent. La resta de l'experiment es deixa en funcionament, degut a la lenta evolució del procés d'hidratació de la barrera en condicions naturals, i d'aquesta manera s'aconseguirà un major grau de saturació. L'objectiu d'aquest procediment era obtenir informació directa sobre l'evolució del comportament THM mitjançant l'anàlisi de mostres, i pels THG. En la mateixa instal·lació subterrània es va determinar la densitat i la humitat d'un gran número de mostres en la seva extracció. Es va poder observar que la distribució d'humitat i densitat dins d'una mateixa secció presenta simetria radial. En el cas de la humitat, és més elevada en l'anell extern (més pròxim a la paret de la galeria) i va disminuint cap a l'interior. Mentre que la densitat seca es comporta inversament. El grau de saturació mig calculat és de 85%. Es pot assegurar que els valors d'humitat mitjos coincideixen amb els valors que registraven els sensors d'humitat relativa immediatament abans de l'extracció. Així mateix, els valors de densitat i humitat determinats en laboratori (uns mesos després), són similars als obtinguts in situ en mostres agafades en posicions anàlogues, el que prova que les condicions inicials de les mostres s'han preservat correctament. En la Fig. 5.30 es pot veure la diferència de coloració de la bentonita segons el contingut d'aigua observada després de les primeres extraccions del desmantellament, on en els anells exterior es mostra d'un color més fosc.

A més de la determinació de la humitat i la densitat, en els blocs provinents de Grimsel, també s'ha mesurat la conductivitat tèrmica i la humitat relativa. Posteriorment s'han obtingut mostres per la seva caracterització mineralògica i geoquímica, i unes altres per determinar les propietats HM, com la capacitat d'expansió, la permeabilitat, la relació succió/humitat i la consolidació a alta pressió.

Per poder avaluar les modificacions a les que està sotmesa la bentonita com a material de barrera, s'ha de conèixer molt bé les propietats sense tractar (inicials) del material. Per això en el projecte FEBEX I, es van obtenir els anomenats valors teòrics, i adquirint així una bona base de dades de la bentonita.

Fig. 5.30: Aparença de la barrera de bentonita després del desmantellament de les primeres seccions i de l'extracció d'un radiador.

Si s'observen els blocs de bentonita, que s'extreuen de la barrera durant la el desmantellament, es pot afirmar que els que es troben a l'anell més proper a radiador o escalfador, han sofert una certa contracció (1% en els blocs de l'anell interior, mentre que els blocs de l'anell exterior han augmentat un 4%); segurament deguda a la pròpia escalfor que es genera al voltant. Com ja s'ha anat introduint, l'extracció de mostres es va realitzar en seccions verticals a la normal de l'eix de la galeria, agafant així mostres de diferents zones radials, facilitant així la representació de les alteracions i de la distribució fisicoquímica de la bentonita.

A continuació es descriuran les conclusions més rellevants obtingudes en el desmantellament del primer radiador de l'experiment FEBEX sobre el comportament THM (CIEMAT:

- Els valors mitjos del contingut d'aigua i la densitat seca obtinguts en diverses seccions verticals al llarg de la galeria presenten un axial de simetria.
- Degut a la presència d'una franja geològica de lamprophyre la conductivitat d'aigua al voltant de la galeria no era homogènia, tot i les característiques generals geològiques de la zona d'estudi.
- Hi ha una bona concordança entre els resultats obtinguts in situ en l'assaig GTS i els resultats obtinguts en el laboratori, inclòs passats uns mesos. Això confirma que els procediments d'embalatge i transport dels blocs de bentonita són apropiats.
- Durant els cinc anys d'experiment, la barrera va sofrir un augment del volum total, el que implica una disminució de la densitat seca dels blocs de bentonita de 1'70 g/cm^3 a una densitat mitja de 1'58 g/cm^3. Tot i així el valor obtingut és un poc més baix (1'60 g/cm^3) que el valor donat per AITEMIN, tot pot ser degut a la descompressió produïda durant el desmuntatge de la barrera.
- La densitat seca va lligada a una redistribució i un augment de la dimensió dels porus, que no es relaciona amb la posició en la que es troba la mostra en la barrera. Es revela una disminució del percentatge de porus petits i un augment dels grans.
- La conductivitat hidràulica de les mostres de Grimsel es relaciona clarament amb la densitat seca i amb la seva posició axial en la barrera. En el cas de les mostres de densitat més alta hi ha una diferència molt destacada amb els valors teòrics.
- La pressió de preconsolidació per sota de 10 MPa s'ha mesurat en totes les mostres, fins i tot més baix en les mostres externes de la barrera. Això significa una disminució important pel que fa a la pressió inicial de preconsolidació de 40 MPa, deguda potser a un augment de volum durant la hidratació en la microestructura.
- La conductivitat termal augmenta amb la concentració d'aigua, el que fa que els blocs ubicats en la zona externa de la barrera tinguin valors de conductivitat més alts. Tot i així els blocs intern i entremitjos presenten valors inferiors de conductivitat termal als esperats, potser influïts per la temperatura del radiador o escalfador.

Pel que fa a les característiques mineralògiques i geoquímiques de les mostres obtingudes en Grimsel, no suggereixen cap gran modificació o succés en la bentonita duran l'experiment. Però es pot destacar:

- Una disminució lleu del contingut de magnesi segons la mostra no tractada, i també disminucions de Ca^{+2}, FeO i SO_2.
- A nivell microscòpic s'ha detectat en les mostres més properes al radiador que el feldespat potàssic ha precipitat i s'ha dissolt. El que

aporta la idea, la temperatura és un factor potencial que es relaciona amb els canvis mineralògics.

- Degut a la hidratació de la bentonita en els blocs externs, en contacte amb el granit es produeix la dissolució i la dilució dels minerals més solubles del rastre de la bentonita (sulfats, carbonats i clorurs), que es transporten cap a la part interna de la barrera. S'observa que a major temperatura la sal es mou més ràpid, el que fa que les zones properes al radiador augmenti la concentració de clorurs.

Com a resum comentar que tots els resultats experimentals demostren que la matriu del granit de la galeria FEBEX, no ha sofert danys ni per l'excavació, ni per les cargues THM sofertes posteriorment pel massís; preservant fins al moment les propietats inicials hidràuliques i mecàniques. Tot i així, a escala local es podrien presentar certes incerteses en el comportament de les juntes naturals, però no és probable la formació continua d'una via de migració de radionucleids al llarg de la galeria. Finalment, tenir un certa cura, a nivell macroscòpic, a un augment de la plasticitat en les mostres de la paret pròxima a la galeria que es podria lligar amb l'augment de sodi, el que podria propicia la formació de col·loides i a la vegada la migració de d'actínids. Per donar uns millors resultats, es va crear el projecte FEBEX II, on s'inclou un programa més ampli de probes en laboratori per completa la segona fase del programa FEBEX. En el FEBEX II, no només s'acaben els treballs que han quedat a mitges, sinó que també es proposa unes noves probes dirigides a obtenir més informació sobre el comportament THM de la bentonita des d'un punt de vista microestructural i cap un canvi de la composició química de les sals dissoltes en el comportament mecànic del sòl (CIEMAT, 2004b).

5.4. PROJECTES EN EL LABORATORI SKB ÄSPÖ. PROJECTE PROTOTYPE REPOSITORY

L'Äspö Hard Rock Laboratory (ÄHRL) és un complex construït a prop de la ciutat d'Oskarshamn al sud-est de la costa de Suècia. El laboratori d'Äspö es considera actualment el més avançat dels laboratoris existents en granit. La seva complexitat litològica i estructural de l'àrea on s'ubica, més la importància de la circulació d'aigües subterrànies li donen unes característiques molt adequades per l'estudi del funcionament geoquímic, hidrogeològic i geomecànic d'un emmagatzematge definitiu de residus. La seva construcció va començar a l'Octubre de 1990 i va finalitzar a l'estiu de 1995.

L'elecció de l'emplaçament de l'ÄHRL a l'illa d'Äspö es deu a 2 motius fonamentals:

- Per una banda, és una àrea poc poblada i per altre banda, geològicament parlant, es tracta d'una zona molt fracturada, la qual cosa permet estudiar el comportament del cementiri en condicions hidràuliques molt adverses i complexes. Aquest no serà l'emplaçament

definitiu del futur cementiri de residus que es portaria a un lloc menys fracturat i amb menor presència d'aigua.

- L'altre factor important va ser la seva localització. A l'àrea es troben tres centrals nuclears, la qual cosa disminueix notablement la problemàtica social que una instal·lació d'aquestes característiques podria crear al seu entorn. No obstant, amb la claredat i transparència amb que treballen les administracions de Suècia en general els problemes que poden sorgir amb la població seran sempre menors que els que sorgeixen a Espanya. Recordem que el Projecte FEBEX amb resultats científics molt satisfactoris s'està realitzant a Suïssa ja que no es va poder portar a terme a Espanya per l'alarma social que es va generar al seu moment.

L'ÄHRL està excavat en material diorític amb vetes i inclusions de granit i pegmatita. Existeix una família de fractures principals amb direcció NW les quals permeten el flux d'aigua a través de la roca. Aquesta aigua prové del mar Bàltic i incideix en el flux del medi fissurat.

El laboratori consisteix, principalment, en una galeria de 3.600 metres de longitud que arriba a una profunditat màxima de 450 metres en espiral (Fig. 5.31). La galeria va ser excavada des de la península, fins a la part sud de l'illa, a on continua en espiral fins a la profunditat màxima.

Fig. 5.31: Vista de la geometria dels túnels excavats per a construir el ÄHRL.

Un dels molts projectes d'investigació i desenvolupament que s'estan desenvolupant a Äspö, mitjançant l'empresa sueca de residus SKB (Swedish Radioactive Waste Agency), és l'anomena't "Backfill and Plug Test". En aquest projecte s'estudien les característiques d'un material candidat per a segellar les galeries d'accés o reblert (backfill), on l'efecte de la salinitat de l'aigua injectada

sobre el comportament hidro-mecànic del backfill és important. Per tant, s'ha de tenir present la influència de la salinitat en paràmetres del backfill importants per a l'anàlisi dels resultats obtinguts in situ com són la compactabilitat del backfill o la seva permeabilitat, entre d'altres. En aquest projecte s'ha analitzat la viabilitat d'utilitzar una mescla de bentonita sòdica (MX-80) i granit de la pròpia excavació com a reblert d'una galeria d'accés (Campol Aymerich, E. 2005). En aquesta tesina no s'entrarà en aquest projecte ja que no és sobre la barrera de bentonita, però sí es centrarà en explicar certs trets del projecte Prototype Repository que és un projecte de demostració financiat per la CE on es posa en pràctica el disseny suec-finlandès d'un emmagatzematge geològic profund. També es realitzen projectes com el KBS-3H (una revisió del Prototype) que es dur a terme en uns contenidors en horitzontal semblant a la geometria que proposa el concepte espanyol d'emmagatzematge de residus, i el projecte TBT promogut per l'agència francesa ANDRA, que consisteix en un pou vertical en granit on s'hi han instal·lat un radiador de calor rodejat dels anells de bentonita i l'altre rodejant una capa interna d'arena i una externa de bentonita (MX-80). A diferència dels altres assajos THM de barreres de bentonita, en aquest s'espera assolir temperatures per sobre als 100ºC en la superfície dels radiadors. En el contacte granit-bentonita es controla la injecció d'aigua amb la finalitat d'accelerar la saturació de la bentonita. En l'actualitat ja s'han obtingut aquestes temperatures i s'està modelitzant i realitzant les previsions del comportament de la barrera.

El projecte Prototype Repository, a semblança al projecte FEBEX comentat en l'apartat anterior, també correspon a un assaig d'escalfament a escala real, però en aquest cas seguint el concepte suec d'emmagatzematge.

En aquest cas el projecte s'ha dut a terme des d'una galeria d'accés on s'hi ha excavat verticalment 6 pous verticals. Els pous fan uns 7'8 metres de profunditat des de la base de la galeria d'uns 70 metres de longitud. En aquests pous s'hi instal·len unes fonts de calor simulant el contenidor de residus i es rodegen d'uns anells prefabricats de bentonita sòdica Mx-80 compactada que formen part substancial de la barrera. Les galeries s'han acabat segellant amb el reblert comentat abans per el projecte Backfill and Plug Test que es compacta in situ. Aquest assaig contempla la instal·lació de 6 radiadors elèctrics.

Aquest projecte va començar a finals del 1999 i es té previst deixar-ho en funcionament, 4 dels pous situats al final de la galeria, durant uns 20 anys, i equips com els de la UPC, participen en la modelització THM de la barrera d'argila. Durant aquest temps s'espera aconseguir l'estat de saturació de la barrera d'argila, seguint amb la retòrica dels projectes més demostratius que s'han comentat, la salinitat de l'aigua i la interacció química-hidràulica-mecànica de la barrera són aspectes que s'han de considerar en el projecte.

5.5. CONCLUSIONS

A l'hora de comparar els resultats obtinguts en un laboratori a escala reals amb els del model, moltes vegades cal parar atenció que en el model no es pot reproduir les propietats heterogènies de la barrera de bentonita. Aquesta resposta heterogènia es deguda a les condicions i les propietats de permeabilitat del material granular bentonític, i a la possible segregació del material durant el seu emplaçament. A més, s'ha de tenir present les mesures geolèctriques i sísmiques per a demostrar un bon comportament hidràulic en l'evolució de la zona EDZ durant el procés de saturació.

Com ja s'ha comentat, en un principi el danys són induïts pel canvi en les tensions associades a l'excavació del túnel, també pels canvis de la succió generats per la ventilació del túnel i pels canvis produïts per la calefacció de la càpsula. Els experiments EB i HE realitzats en l'argila d'Opalinus són uns bons exemples per representar el efecte de la *Excavation Disturbed Zone* (EDZ). L'anàlisi ha demostrat les capacitats dels model desenvolupat per utilitzar tots els fenòmens mencionats. En el experiment HE experimenta les demostracions que el gruix de la zona danyada al voltant de la perforació és petita. En el cas de l'experiment EB, s'han detectat zones danyades més grans, a més en el càlcul del període de ventilació del túnel és capaç d'induir un dany significatiu (Alonso, E.E. i d'altres, 2003).

En el cas de l'argila del laboratori de Mont Terri (Suïssa), la roca Opalinus Clay, s'ha caracteritzat des d'un punt de vista de macroestructura, on s'ha obtingut la corba de retenció d'aigua, la conductivitat hidràulica, la seva resistència i deformació. També s'ha analitzat des de la perspectiva de la microestructura que s'ha enfocat a la caracterització mineralògica obtinguda per la difracció de rajos X, la distribució de la dimensió dels porus determinada per la porosimetria de mercuri (MIP) i la microscòpia electrònica (SEM). Projectes com HE i el VE, duts a terme en el laboratori de Mt. Terri, han col·laborat directament en aquesta caracterització.

Durant el desenvolupament del projecte MODEX-REP (Bure, França), el qual es dur a terme a una profunditat de 500 metres en una capa d'argila de l'edat mesozoica del tipus Callovo-Oxfordian, i el HE es va posar en marxa un model constitutiu sofisticar per la caracterització de roques argiloses que s'inclou en la versió experimental del Code Bright que s'utilitza en els càlculs HM i THM. Quan es parla d'un model constitutiu es fa referència a la combinació dels conceptes d'elastoplasticitat, que representa la matriu argilosa de la roca, i el concepte dolor que descriu la cimentació afegida per idealitzar la roca argilosa.

Entrant una mica en el comportament HM dels materials formats per pellets de bentonita compactada, com és el cas del projecte EB, la informació és quasi bé nul·la. Per tant, com a material innovador, mitjançant aquest projecte s'ha procurat buscar i identificar els procediments més adequats per la caracterització de la resposta del material. Amb l'experiment EB (octubre 2000-

novembre 2003) s'ha comprovat que la utilització de bentonita com a barrera d'enginyeria, és una proposta molt factible.

En l'assaig HE, a part d'obtenir uns coneixements sobre el comportament THM, s'ha treballat amb pressions mecàniques més altes, degut a que es treballa amb blocs de bentonita de major densitat seca i un ambient més corrosiu, ja que s'utilitza aigua intersticial salina.

A l'hora d'identificar els diferents mecanismes interns de canvi de volum que succeeixen en el material, en aquest cas en la bentonita, un dels assajos a utilitzar és el d'intrusió de mercuri (MIP) en el projecte EB. Per aquest assaig, si es vol comparar una bentonita de FEBEX amb una densitat de 1'45 Mg/m^3 i una mostra de pellets de bentonita de densitat de 1'55 Mg/m^3, s'ha de normalitzar l'índex d'espais buits injectat (e_{int}) respecte a l'índex de buits total (e_{total}). En la Fig. 5.32 es mostren comparats els resultats de l'assaig MIP realitzats sobre una mostra de pellets i una mostra de bentonita FEBEX. En la representació del grau de saturació injectat, $Sr = e_{int} / e_{total}$, en funció de la dimensió dels porus (Fig.5.33), es pot observar que en el cas de les mostres de pellets el grau de saturació injectat és superior a les mostres de bentonita de FEBEX. Una explicació d'aquest comportament és que els gràmuls dels pellets tenen una major densitat, que determina per una mateixa densitat seca de la mostra, una porositat més accessible.

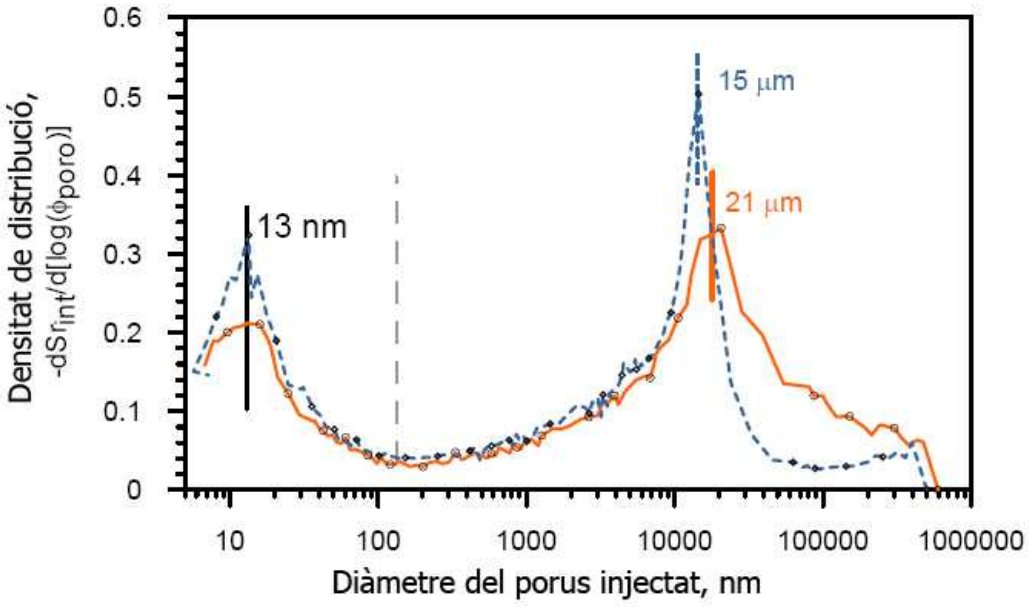

Fig. 5.32: Comparativa dels resultats obtinguts en l'assaig MIP sobre una mostra de pellets i una mostra fabricada amb bentonita FEBEX, relacionant el diàmetre de porus injectat amb la densitat de distribució (Hoffman,C. 2005).

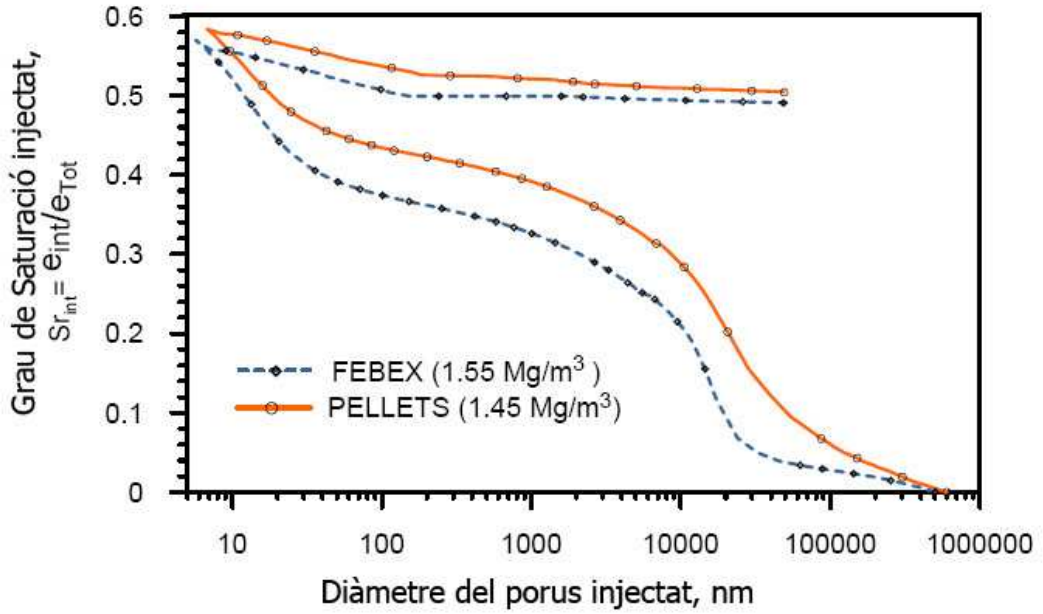

Fig. 5.33: Comparativa dels resultats obtinguts en l'assaig MIP sobre una mostra de pellets i una mostra fabricada amb bentonita FEBEX, relacionant el diàmetre de porus injectat amb la amb el grau de saturació injectat (Hoffman, C. 2005).