

CARLOS MANOEL NIEBLE
GUIDO GUIDICINI
LUIZ GUILHERME DE MELLO

BARRAGENS EM ARENITOS BRANDOS NO BRASIL



São Paulo, 2021

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 GÊNESE, CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAS	15
2.1 TERMINOLOGIA	15
2.2 O QUE É O ARENITO E OS TIPOS DE ARENITO	16
2.3 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO	18
2.4 ESTRUTURAS SEDIMENTARES PRIMÁRIAS	19
2.4.1 Estratificação (ou acamamento)	19
2.4.2 Diaclasamento	21
2.5 MUDANÇAS APÓS A SEDIMENTAÇÃO	21
2.5.1 Litificação por diagênese	21
2.5.2 Litificação por cimentação	22
2.5.3 Laterização do arenito	23
2.5.4 Formação de couraças	25
2.6 ESTRUTURAS ADQUIRIDAS	26
2.6.1 Estruturas de alívio	26
2.6.2 Juntas de tração subverticais	27
2.6.3 Diques clásticos	28
2.6.4 Juntas de cisalhamento sub-horizontais	28
2.6.5 Falhas de acavamento (em bigode)	29
2.6.6 Cavidades associadas a arqueamento	30
2.6.7 Cavidades de lixiviação e arraste	30
REFERÊNCIAS	31
3 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS	33
3.1 INTRODUÇÃO	33
3.2 A QUAIS ARENITOS ESTE LIVRO SE REFERE?	34
3.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	39
REFERÊNCIAS	61
4 BACIAS SEDIMENTARES E BARRAGENS EM ARENITOS	65
4.1 GÊNESE DAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS	65

4.2	ESCALA DO TEMPO GEOLÓGICO	68
4.3	PRINCIPAIS BACIAS SEDIMENTARES INTRACRATÔNICAS	69
4.3.1	Bacia do Amazonas.....	69
4.3.2	Bacia do Parnaíba.....	71
4.3.3	Bacia Sanfranciscana	75
4.3.4	Bacia do Paraná.....	79
4.3.5	Bacia dos Parecis/Alto Xingu.....	83
4.4	Bacias sedimentares e barragens em arenitos	85
4.4.1	As vertentes de construção de barragens.....	85
4.4.2	Primeiros empreendimentos em arenitos	86
4.4.3	Distribuição geográfica das barragens em arenitos	90
4.4.4	Quadro sinóptico de barragens em arenitos	93
	REFERÊNCIAS	101
5	PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS EM ARENITO	103
5.1	INTRODUÇÃO	103
5.2	PROBLEMAS RECORRENTES.....	103
5.2.1	Erodibilidade.....	103
5.2.1.1	Erodibilidade perante o fluxo interno (erosão tubular, sifonamento, <i>piping</i>)	103
5.2.1.2	Erodibilidade ao fluxo d'água	111
5.2.2	Capacidade de suporte.....	113
5.2.3	Durabilidade	114
5.2.4	Friabilidade	115
5.2.5	Perda de resistência à saturação.....	116
5.2.6	Expansibilidade.....	117
5.2.7	Restrições como agregado.....	117
5.2.8	Injetabilidade.....	118
5.2.9	Rebaixamento do lençol freático.....	119
5.2.10	Fragilidade ao desmorte	120
	REFERÊNCIAS	122
6	ESCARIFICAÇÃO E DESMONTE DE ROCHAS.....	123
6.1	OS CATÁLOGOS DA EMPRESA CATERPILLAR.....	123
6.2	AS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS	125
6.3	DESMONTE DE ROCHAS BRANDAS.....	133
6.4	EXPERIÊNCIA BRASILEIRA.....	137
6.5	DESMONTE ESCULTURAL (PRÉ OU PÓS OU PERFURAÇÃO LINEAR)	139
6.6	EXPERIÊNCIAS DE ESCARIFICABILIDADE E DESMONTE	139
6.7	RESUMO DA EXPERIÊNCIA BRASILEIRA E INTERNACIONAL	150
	REFERÊNCIAS.....	151

7 PERDA DE RESISTÊNCIA POR SATURAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE - PIPING	153
7.1 PERDA DE RESISTÊNCIA POR SATURAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE	153
7.2 PIPING	162
REFERÊNCIAS.....	171
8 REBAIXAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO	173
8.1 HISTÓRICO	173
8.2 TIPOS DE REBAIXAMENTO	175
8.2.1 Bombeamento direto	175
8.2.2 Ponteiras filtrantes (well points)	175
8.2.3 Poços profundos	176
8.2.4 Galerias de drenagem	178
8.3 EXPERIÊNCIAS DE REBAIXAMENTO EM BARRAGENS	180
8.3.1 UHE Curuá-Una	180
8.3.2 PCH Canoa Quebrada	183
8.3.3 PCH Garganta da Jararaca	186
8.3.4 UHE Estreito	190
REFERÊNCIAS.....	193
9 INJETABILIDADE E OUTROS DISPOSITIVOS VOLTADOS À INTERCEPTAÇÃO DE FLUXO	197
9.1 GENERALIDADES	197
9.2 INJEÇÕES QUÍMICAS	199
9.3 INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO	202
9.4 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA	210
9.4.1 UHE Colider	210
9.4.2 UHE Estreito	213
REFERÊNCIAS.....	218
10 TÉCNICAS, PROCEDIMENTOS E DISPOSITIVOS A CONSIDERAR NO PROJETO DE ESTRUTURAS EM ARENITOS BRANDOS	221
10.1 INTRODUÇÃO	221
10.2 FEIÇÕES GEOLÓGICAS QUE AFETAM A SEGURANÇA	222
10.3 PROCEDIMENTOS EM BARRAGENS EM ARENITOS BRANDOS E EM SEUS SOLOS POROSOS	225
10.4 PROCEDIMENTOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO SOBRE ARENITOS BRANDOS	226
10.5 TRATAMENTO DE TALUDES PROVISÓRIOS E DEFINITIVOS	232
10.5.1 Velocidade de vibração nas escavações	232
10.5.2 Danos ao maciço remanescente	233

10.5.3 Generalidades sobre estabilidade de taludes provisórios e definitivos ...	234
10.5.4 Estabilidade de taludes de arenito brando	237
10.5.5 Estabilização de taludes em arenitos brandos	238
10.6 TÉCNICAS E DISPOSITIVOS EM OBRAS SUBTERRÂNEAS.....	240
REFERÊNCIAS	247
 BIBLIOGRAFIA	 251

01

INTRODUÇÃO

Entende-se por barragem a obra que se efetiva em rio, ribeirão ou curso de água, com a finalidade de represar e armazenar a água com propósitos múltiplos, desde a distribuição; o abastecimento para fins agrícolas, domésticos ou industriais; o acionamento das turbinas para geração de energia elétrica; o controle de cheias; a regularização de vazões; para o lazer ou outras finalidades. Barragens atendem também às necessidades dos setores de mineração e industrial, para armazenamento de rejeitos e resíduos dos processos de transformação, com procedimentos construtivos próprios.

As barragens consistem em estruturas feitas de terra, enrocamento, pedra argamassada e/ou concreto erguidas com diferentes metodologias construtivas, dotadas e conjugadas a outras estruturas anexas e complementares, tais como: canais e túneis de adução, de aproximação e descarga, vertedouros, bacias de dissipação de energia, casas de força, tomadas de água etc.

Este livro apresenta tópicos sobre barragens assentes em arenitos, com ênfase em arenitos brandos.

Os autores tiveram a preocupação a respeito de como apresentar sua experiência associada a modelos geológicos, hidrogeológicos e geomecânicos em arenitos brandos, concluindo que seria muito complexo tentar abranger todas as particularidades necessárias, tendo em vista a diversidade dos aspectos condicionantes. Isso impõe que os temas apresentados caibam nas páginas do livro, necessariamente de forma compacta e resumida.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam ao leitor o material foco, os arenitos, independentemente de seu grau de consistência e litificação e discutem como caracterizá-los.

Já o Capítulo 4 relaciona as barragens brasileiras construídas em arenitos. Houve controvérsias, entre os autores, se deveriam incluir barragens das Usinas Hidrelétricas de Sinop e Dardanelos, pois elas estão situadas na borda de bacia geológica e os materiais de fundação sofreram metamorfismo de baixo grau, o que os transformou em meta-arenitos. Optou-se por incluir essas duas obras, mas com esta ressalva.

A partir do Capítulo 5, abordam-se os aspectos de engenharia das barragens em arenitos, tais como os problemas geotécnicos decorrentes de condições de assentamento das estruturas em materiais brandos.

A ideia básica que norteou os autores nos capítulos seguintes é mostrar ao leitor a experiência acumulada em aspectos de projeto e execução de barragens em arenitos brandos, no Brasil.

Assim, discutem-se aspectos relacionados à escarificabilidade e ao desmonte com explosivos, à perda de resistência e capacidade de suporte com a saturação, à friabilidade, à durabilidade dos materiais perante ciclagens (entendidas como ciclos de secagem e umedecimento), à erosão regressiva (*piping*) e erodibilidade, à expansibilidade, ao rebaixamento do lençol freático, à injetabilidade, ao tratamento de taludes provisórios e definitivos, aos detalhes geológicos que afetam a estabilidade, com base nas experiências vividas por cada um dos autores.

Na abordagem ao modelo geomecânico, discute-se o que é usual de se esperar e o que foge ao usual, como no caso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Estreito, no rio Tocantins, onde o arenito, na condição de areia muito pouco cimentada, tornava-se menos competente com o aumento da profundidade, devido à presença de depósitos desérticos subaquosos (pretéritos) de rios efêmeros ou temporários, o que representa uma inversão do modelo usual de evolução intempérica de meios rochosos.

O conhecimento detalhado de cada uma das solicitações que são aplicadas pelas estruturas de barramento em ombreiras e na fundação é requisito básico da engenharia de barragens e é o principal objetivo a ser perseguido.

Em usinas hidrelétricas, as estruturas que tipicamente compõem o empreendimento são obras de concreto, que constituem o circuito gerador formado pela

tomada de água/casa de força e canal de fuga e o circuito hidráulico, com o vertedouro, os canais de aproximação e restituição e a bacia de dissipação. A conexão entre essas estruturas, para fechamento do perímetro do reservatório, envolve barragens que podem apresentar os mais diferentes tipos de seção transversal: desde as barragens homogêneas de terra, ou terra-enrocamento, passando para enrocamento com núcleo asfáltico esbelto, ou enrocamento com face de concreto, de concreto compactado a rolo, ou de concreto convencional.

Todas essas estruturas aplicam esforços de compressão associados a tensões de cisalhamento no maciço de fundação de cada componente da obra. A implantação dessas estruturas, cada qual com cota de fundação definida em certa profundidade, em relação à superfície do terreno, sempre envolve escavações, as quais, por sua vez, requerem taludes temporários ou definitivos estáveis, e devem ter seu processo executivo cuidadosamente avaliado de modo a não prejudicar as características do maciço rochoso remanescente.

As verificações tradicionais de estabilidade das estruturas levam à necessidade de estudar, interpretar e postular parâmetros geomecânicos ou geotécnicos que representem adequadamente as características originais do maciço arenítico, bem como avaliar se esses parâmetros irão sofrer deterioração durante as obras propriamente ditas, quando o alívio de tensões, a aplicação de esforços temporários e a exposição aos agentes meteorológicos irão exercer sua influência.

Adicionalmente, essas estruturas estarão submetidas à percolação d'água do reservatório através do maciço de fundação e pelas ombreiras, levando à saturação do meio e criando gradientes hidráulicos capazes de afetar as propriedades geotécnicas originais do maciço, exigindo, assim, a adoção de importantes decisões de projeto com relação ao comportamento hidráulico do conjunto barragem/fundação.

Para uma visão ampla e introdutória das discussões apresentadas ao longo do texto, recomenda-se a leitura dos “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”, publicado pela Eletrobrás em 2003.

E a quem se dedica este livro? Aos estudantes de Engenharia e Geologia, ou de cursos de pós-graduação, e a todos os que desejam saber mais sobre barragens em arenitos. Trata-se de um livro de consulta, cuja intenção é dar ênfase a arenitos brandos. Contribuirá, principalmente, para aqueles que desejam se preparar para ter novas experiências, com base nas diversas lições extraídas de antigas barragens em arenito – sobretudo as da bacia Amazônica e do Pantanal Matogrossense.

02

GÊNESE, CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAS

2.1 TERMINOLOGIA

Um código de linguagem em vigor em nosso meio geológico confere ao sufixo “ito” a propriedade de distinguir solos de rochas; assim, areia é solo, enquanto arenito é rocha. Da argila, surge o argilito; do silte, o siltito.

Aparentemente, a coisa é simples: basta acrescentar ao termo de solo o referido sufixo, para mudar sua natureza, tornando-a rochosa. Esse jogo de palavras é, na verdade, uma primeira referência à tônica que se procura imprimir ao trabalho, na discussão dos aspectos relacionados à implantação de barragens sobre esses “materiais de fronteira”, que são os arenitos brandos.

É importante entender como definir, efetivamente, o momento em que um solo gradua para rocha, ou, reciprocamente, quando uma rocha intemperizada adquire as características de solo. Uma regra empírica, usada no meio geotécnico, determina que, ao serem imersos em água, os solos se desintegram, ao passo que as rochas conservam sua integridade quando imersas. Mas, como em toda regra, ocorrem exceções, por exemplo, as relacionadas à presença de minerais expansivos no seio da rocha, que provocam sua desintegração, às vezes de forma “pirotécnica”.

Dessa forma, a definição do limite entre solo e rocha é um desafio permanente à capacidade de discernimento do meio técnico. Essa diferenciação é supérflua quando a rocha exibe um grau de litificação avançado, o qual se traduz em características

geotécnicas elevadas, mas ganha relevância à medida que a rocha sedimentar se torna mais branda e frágil, aproximando-se da vaga e tênue “fronteira” referida.

■ 2.2 O QUE É O ARENITO E OS TIPOS DE ARENITO

O termo **arenito** se refere, genericamente, ao acúmulo de grãos de areia que, por algum processo natural, adquiriram características de ligação ou “coerência”, conservando sua integridade quando submetidos a solicitações externas, por exemplo, a imersão em água. O termo **areia** se refere a grãos minerais, de natureza e composição variadas, com distribuição granulométrica compreendida entre a fração silte (0,064 mm) e a fração pedregulho (2,0 mm), segundo definição usualmente aceita no meio geotécnico e baseada na escala proposta em “A scale of grade and class terms for clastic sediments” por Wentworth (1922). Contudo, existem discrepâncias na denominação das frações granulométricas, em função de preferências pessoais, que variam de autor a autor. Esse assunto será retomado logo adiante, no **item 2.5**. Além disso, salienta-se que, dentro da faixa granulométrica adotada para definição do arenito, grãos minerais das mais variadas origens e natureza mineralógica e/ou petrográfica podem se agregar em sua constituição.

A origem do arenito está vinculada ao mecanismo de acumulação de frações detríticas, em meio aquoso ou subaéreo, posteriormente submetidas aos processos de diagênese e litificação. Após sua acumulação, os grãos constituídos por minerais instáveis podem estar sujeitos a diversos tipos de atuação por parte dos agentes naturais, o que provoca mudanças nas características do arenito.

O termo diagênese abrange o conjunto de modificações físicas, químicas e biológicas a que um sedimento é submetido, desde sua deposição até se efetivar sua litificação sob a atuação dos agentes externos, embora esteja limitado a condições de pressão confinante e temperatura baixas. Apesar de não existir uma “fronteira” nítida, observa-se que, na presença de condições de temperatura e de pressão confinante mais elevadas, entra-se no domínio do metamorfismo.

Quando são submetidos a agentes intempéricos – em meio climático quente e úmido, por exemplo –, a tendência dos grãos de feldspato é a de se degradarem mineralogicamente, transformando-se em argilas, modificando, assim, a distribuição granulométrica e conferindo cimentação ao arenito através da nova matriz argilosa.

Ao se falar de arenitos, comumente o termo “maturidade” é empregado para expressar o nível de evolução ao qual o sedimento foi submetido, através das sucessivas etapas de alteração dos constituintes minerais, transporte e retrabalhamento. Na proximidade dos locais da rocha mãe, o arenito contém quantidades significativas de fragmentos rochosos, em processo de alteração incipiente. Quanto mais prolongado for o transporte do sedimento, maior será a chance de esses componentes se separarem e sofrerem alterações, transformando-se em argilas, ou minerais dissolvidos (em calcita, por exemplo). Disso resulta um enriquecimento proporcional do quartzo, que é muito estável, no sedimento; e o produto final, o arenito, tenderá a ser unimineralico, constituído quase exclusivamente por grãos de quartzo.

Há diversas razões para que o quartzo seja o principal constituinte dos arenitos, dentre elas o fato de ser um mineral de elevada dureza, ausência de clivagem, estável nas condições vigentes na superfície da terra, e de muito baixa solubilidade em água. Além disso, é o mineral mais comum em rochas do embasamento cristalino, que representam a principal fonte dos detritos.

O índice de maturidade mineralógica do arenito se expressa pela relação quartzo/feldspato. Os arenitos que possuem menos de 5% de feldspato ou partículas de rochas são chamados ortoquartzosos (ou quartzo-arenitos). Os quartzo-arenitos constituem o estágio final de evolução de sedimentos arenosos, apresentando na fração detrítica mais de 95% de quartzo. Sua cor costuma ser esbranquiçada; porém, pode ser rósea ou avermelhada em função do revestimento que envolve os grãos, em geral decorrente da presença de íons ferrosos ou férricos.

Na **Figura 2.1**, a variação na constituição mineralógica dos arenitos está representada através da sucessão de diagramas triangulares QLF - Quartzo, feldspato e fragmentos líticos (Pettijohn, 1972), em função de mudanças granulométricas e do aumento da matriz argilosa.

Com 25%, ou mais, de grãos de feldspato, os arenitos passam a ser chamados de arcosianos; mas, também podem ser denominados de arcósios. O arcósio típico é uma rocha de granulação grossa e coloração cinza ou róseo-avermelhada, esta última atribuída a fragmentos de feldspato potássico.

Os arenitos líticos são caracterizados por conter mais de 25% de partículas detríticas de fragmentos de rochas, além de ter pouca ou nenhuma matriz. Apresentam-se, geralmente, na cor cinza e com abundantes partículas constituídas

principalmente de rochas sedimentares (folhelho, siltito, arenito), metamórficas de baixo grau (ardósia, filito, mica-xisto) e ígneas.

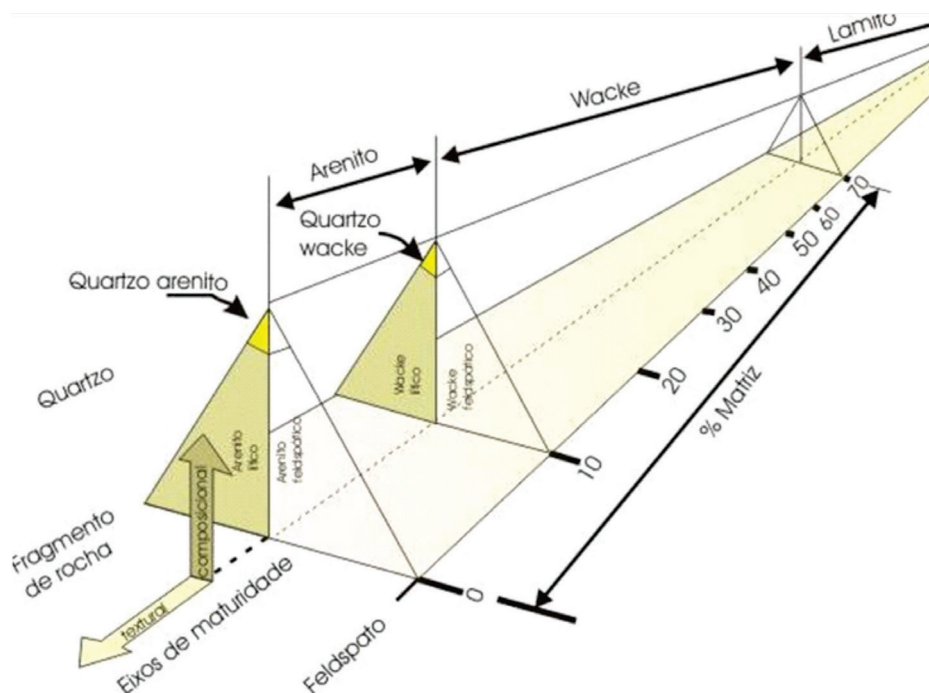


Figura 2.1 - Composição de diagramas triangulares QLF (quartzo, feldspato e fragmentos líticos), mostrando a variação na constituição mineralógica do arenito, em função do aumento percentual de matriz argilosa.

Fonte: Pettijohn et al. (1972).

2.3 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO

A distribuição granulométrica dos sedimentos detríticos e, conseqüentemente, das rochas sedimentares resultantes, onde os arenitos se incluem, constitui o principal critério usado em sua classificação e reflete o complexo equilíbrio decorrente da diversidade de fatores climáticos, morfológicos, litológicos e hidrodinâmicos dos ambientes de origem e formação.

Dentre as diversas escalas elaboradas para a granulometria de sedimentos detríticos e rochas decorrentes, uma das mais empregadas é a de Wentworth (1922), reproduzida na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 – Escala granulométrica.

Dimensão dos grãos (mm)	Denominação	Sedimento	Rocha
>256	Matacão	Tálus, ou acúmulo de blocos, ou seixos, ou depósito de seixos, dependendo da predominância e distribuição das frações.	Conglomerado, brecha, rudito ou psefito, dependendo da forma e distribuição dos componentes.
256 a 64	Bloco ou calhau		
64 a 4	Seixo		
4 a 2	Grânulo		
2 a 1	Areia muito grossa	Areia	Arenito ou psamito
1 a 0,5	Areia grossa		
0,5 a 0,25	Areia média		
0,25 a 0,125	Areia fina		
0,125 a 0,06	Areia muito fina		
0,06 a 0,004	Silte	Silte	Siltito ou lutito
< 0,004	Argila	Argila	Argilito

Fonte: Wentworth, 1922.

Com frequência, outras denominações são empregadas para identificar frações granulométricas de dimensão superior às das areias, em decorrência da diversidade de possíveis associações granulométricas e de formas de jazimento, além de refletir as preferências e os códigos de linguagem de determinadas categorias profissionais.

2.4 ESTRUTURAS SEDIMENTARES PRIMÁRIAS

As estruturas sedimentares primárias decorrem do processo de transporte e sedimentação, recebendo, também, a denominação de singenéticas, em contraposição às estruturas secundárias ou epigenéticas, que surgem posteriormente à sedimentação.

2.4.1 Estratificação (ou acamamento)

A estratificação (ou acamamento) constitui a primeira e principal estrutura de sedimentos e rochas sedimentares clásticas e reflete as condições de deposição

das partículas sólidas. O conceito de estratificação está intimamente associado ao de camada, que é tida como a unidade de sedimentação, reconhecida como a espessura de sedimento dentro da qual as condições de deposição permaneceram as mesmas. A camada pode ser homogênea, ou constituída por lamelas menores, visíveis a olho nu e sua espessura pode variar entre frações de centímetro até a dimensão métrica.

A estrutura de um sedimento ou de uma rocha sedimentar pode ser maciça, quando homogênea e isenta de estruturas orientadas, ou pode apresentar as mais variadas sequências de camadas, com mudanças na granulação ou na composição mineralógica dos constituintes, alternância de camadas ou lâminas de constituição argilosa ou siltosa, variações laterais de espessura, mudanças na coloração dos sedimentos, diferenciações no grau de arredondamento e esfericidade das partículas (**Figura 2.2**).



Figura 2.2 - Arenitos intemperizados e basculados da formação Utuariiti (Grupo Parecis), no sítio da PCH Apertadinho, rio Comemoração (RO).

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (2008).

A estrutura mais comumente encontrada é a planar, em que os estratos exibem atitude horizontal, desde que não tenham sido perturbados durante o processo de deposição ou por fatores pós-deposicionais. As perturbações durante a deposição, devido a mudanças de energia ou de direção do veículo (geralmente aquoso ou eólico), conduzem com frequência ao aparecimento da estratificação cruzada. Uma terceira estrutura observada com frequência é a gradacional, em

que se verifica uma mudança granulométrica gradativa na vertical, normalmente ocorrendo uma diminuição do tamanho das partículas no sentido ascendente.

2.4.2 Diaclasamento

O processo de diagênese, que acarreta normalmente a transformação do sedimento em rocha, se reflete também no aparecimento de um sistema de diaclases regulares, normalmente constituído por três famílias, sendo uma paralela e as outras duas perpendiculares ao acamamento e também normais entre si. Esse sistema decorre de uma redução volumétrica que o corpo sedimentar sofre, em parte pela perda de água intersticial.

Um sistema de diaclases em rochas sedimentares pode resultar, também, de manifestações tectônicas, mesmo de baixa intensidade, que, tendo afetado o embasamento rochoso profundo, se transmitem para as rochas sedimentares mais superficiais. Da mesma forma, a reativação de antigas lineações de falhamento, por episódios de tectonismo recente, pode deixar sua marca em sedimentos modernos, imprimindo-lhes a mesma atitude de fraturamento.

2.5 MUDANÇAS APÓS A SEDIMENTAÇÃO

2.5.1 Litificação por diagênese

Após a deposição, os sedimentos arenosos são submetidos a diversas solicitações, genericamente reunidas sob a denominação de diagênese, que irão convertê-los em uma rocha sedimentar. De imediato, os sedimentos passam a sofrer modificações decorrentes da carga sobreposta, que resulta da continuidade do processo de sedimentação. Os grãos sofrem um rearranjo espacial, com redução da porosidade, graças também à expulsão de parte da água dos vazios. Consequentemente, verifica-se uma diminuição volumétrica e um aumento de densidade. A intensidade deste processo varia, também, em função do grau de arredondamento dos grãos e de sua distribuição granulométrica. Sedimentos arenosos mal selecionados, contendo frações siltosas e argilosas, passam a ter os grãos de areia envolvidos por essas frações mais finas, que se amoldam e preenchem os vazios, sob o efeito de pressões externas. Esse processo pode ser de longa

duração e pode resultar em mecanismos mais complexos, devido ao aumento das pressões de confinamento e da temperatura do meio, quando entra então em cena o metamorfismo.

2.5.2 Litificação por cimentação

A litificação de um sedimento arenoso resulta, na maioria das vezes, do aparecimento de novos minerais autigênicos, isto é, formados no próprio espaço poroso do sedimento, que passam a exercer ação de cimentação dos grãos. Em longo prazo, os fluidos que percolam pelo meio arenoso acabam propiciando a deposição desses novos minerais, transformando o sedimento em rocha. As reações químicas mais comuns que ocorrem no processo de autigênese são a oxidação/redução, a carbonatação, a troca de cátions e adsorção iônica, a hidratação/desidratação, tudo dependendo do ambiente deposicional em que o sedimento está situado.

Os minerais que mais comumente comparecem neste processo representam diversas formas de sílica, carbonatos, óxidos e sulfetos de ferro, dependendo das condições morfoclimáticas e físico-químicas, isto é, em função de diversos outros fatores externos e internos, que irão determinar os rumos da neoformação. Dependendo das condições do meio serem mais oxidantes ou redutoras, outros minerais poderão surgir, quais siderita, pirita, glauconita, fosforita, etc.

O cimento silicoso aparece com frequência e não está necessariamente vinculado a aportes externos de material, uma vez que a dissolução da sílica em meio aquoso e sua posterior precipitação podem ocorrer no seio do próprio sedimento, principalmente em areias limpas, à custa dos próprios grãos de areia. A sílica solúvel é encontrada na forma de ácido silícico (H_4SiO_4), precipitando em meios de pH superior a 9. A deposição do cimento silicoso ocorre sobre a superfície dos grãos originais, com gradual diminuição do espaço dos poros, até que a nova estrutura passa a se assemelhar a uma rocha cristalina granular, em que todos os grãos se encontram entrelaçados. Quartzo, opala e calcedônia são os neominerais mais comuns de origem silicosa.

A cimentação por calcita é também comum em arenitos e está vinculada à presença de carbonatos e íons de cálcio nas águas do lençol freático, o que ocorre facilmente e com frequência. Para que a calcita se forme, é necessário que exista uma fonte de íons Ca^{+2} e CO^{-2} (carbonato). Os íons Ca^{+2} são encontrados com facilidade nas águas superficiais e do lençol freático, em decorrência da

decomposição de rochas ígneas ou metamórficas. Os íons CO_2 também são abundantes, mas resultam da dissolução de minerais carbonáticos ou dos íons de bicarbonato (HCO^-) produzidos pela dissolução do gás CO_2 presente na atmosfera, pela ação da água.

Outro cimento comum é a hematita (Fe_2O_3), de coloração característica acastanhada e avermelhada, cuja presença é indicativa de que o ambiente foi oxidante durante a diagênese. A hematita é formada pela precipitação dos íons de Fe^{+3} , que se originam a partir dos íons Fe^{+2} , presentes na maioria dos minerais constituintes de rochas ígneas e metamórficas, liberados por processos supergênicos de intemperismo. O íon Fe^{+2} , que pode ser transportado a grandes distâncias em soluções intersticiais redutoras, poderá também precipitar na forma de pirita se a concentração de sulfetos for alta.

Outros cimentos ocorrem em arenitos, a partir da neoformação de minerais por diagênese, em circunstâncias especiais.

2.5.3 Laterização do arenito

Em arenitos brandos, os processos de laterização podem atingir toda a massa ou, dependendo da porosidade da rocha, do tipo e intensidade do diaclasamento e comportamento sazonal do lençol freático, podem se concentrar em um determinado meio, em detrimento do outro. Observa-se, com frequência, em arenitos, que a laterização se concentra ao longo dos planos de diaclasamento, horizontais ou verticais, onde uma estrutura rígida de óxidos de ferro hidratados (limonita) acaba se formando a partir da precipitação de hidróxidos carregados pelas águas ao longo das descontinuidades. A **Figura 2.3** documenta esta particularidade em arenitos brandos da formação Cabeças (Devoniano) no sítio da barragem de Tinguís (PI).

O arcabouço de limonita passa a constituir a parte mais resistente do meio rochoso arenítico. Em afloramentos expostos aos agentes de erosão, a massa de arenito brando pode ser lixiviada e os grãos de areia removidos, por arraste, enquanto a rígida estrutura limonítica permanece preservada. Já em outros casos, o processo de impregnação de sedimentos e/ou solos superficiais por compostos de ferro resulta na formação de crostas porosas, de resistência mecânica desuniforme, de largo emprego em rodovias não pavimentadas, por suas características de drenabilidade (**Figura 2.4**).



Figura 2.3 - Efeitos de erosão diferencial em maciço arenítico (formação Cabeças, Bacia do Parnaíba, PI), em que a laterização ocorreu ao longo de planos de diaclasamento em arenito brando.

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (2015).



Figura 2.4 - Formação de crostas porosas, de resistência mecânica desuniforme, em sedimentos e solos superficiais.

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (2012).

2.5.4 Formação de couraças

A aglutinação de grãos causada pelos óxidos de ferro pode resultar na formação de concreções de dimensões variadas, indo de manifestações localizadas a verdadeiras carapaças contínuas e maciças, que se refletem nas formas topográficas superficiais, exercendo controle da evolução do relevo (**Figura 2.5**).



Figura 2.5 – A sequência escalonada de couraças lateríticas em arenitos da formação Utiariti, rio Sucuruína (MT), exerce o controle do perfil do curso d’água.

Fonte: Acervo dos autores (2012).

A gênese desses depósitos está associada a alternâncias bem definidas de períodos secos e úmidos, em que as oscilações do nível d’água do lençol freático propiciaram a migração de componentes ferro-aluminosos, que envolvem os grãos de solo, concrecionando-os e formando um arcabouço resistente, embora poroso.

Essas camadas concrecionadas apresentam, em geral, elevada porosidade, devido ao grande índice de vazios, que decorre do processo de lixiviação dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica, podendo chegar à formação de canais de lixiviação. Os estudos de permeabilidade indicam que esses sedimentos apresentam um valor médio da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s, valor elevado, em função de sua porosidade e da presença de canais de lixiviação. A capacidade de suporte dos solos concrecionados varia com a profundidade, tendo sido registrados valores de SPT variáveis entre 6 e 40 golpes/0,3 m.

2.6 ESTRUTURAS ADQUIRIDAS

Em rochas sedimentares, a aquisição de estruturas posteriores à fase de deposição decorre de muitos fatores, dentre os quais a atuação de agentes tectônicos (endógenos) e/ou a interação com o meio externo (exógenos). Deixando de lado os agentes endógenos, que atingem indiferentemente qualquer porção da crosta – seja sedimentar, ígnea ou metamórfica –, convém focar a atenção sobre alguns aspectos típicos de rochas estratificadas, adquiridos após a sedimentação.

A maioria dos aspectos focados a seguir não é, entretanto, exclusiva das rochas sedimentares, podendo ser encontrados em outras rochas que compartilham forma de ocorrência similar, com atitude sub-horizontal, como no caso dos derrames basálticos (comuns na região Sudeste do país).

2.6.1 Estruturas de alívio

Em rochas sedimentares com acamamento sub-horizontal, o alívio de tensões verticais e horizontais, decorrente dos processos erosivos e normalmente encontrado em vales fluviais, provoca o surgimento de feições características: a) arqueamento do fundo do vale; b) movimentação das encostas para o interior do vale; c) elevação da orla do vale; d) aparecimento de extensas juntas subverticais abertas; e) deslocamentos horizontais diferenciais ao longo de camadas ou juntas; f) formação de estratos cataclasados ao longo das estruturas deslocadas; g) falhas de empurrão no fundo do vale; h) aumento de porosidade e permeabilidade nas camadas do fundo do vale, podendo resultar em espaços vazios; i) artesianismo diferencial em aquíferos.

Essas feições são descritas na literatura internacional (Patton e Hendron Jr.) e nacional (Barros e Ribeiro) e se encontram condensadas, de forma didática, na seção da **Figura 2.6**. Algumas dessas feições são comentadas, a seguir, um pouco mais extensamente.



Figura 2.6 – Estruturas adquiridas em rochas sedimentares, pela evolução das formas de relevo.

Fonte: Patton e Hendron (1974).

2.6.2 Juntas de tração subverticais

Com a evolução e o aprofundamento do vale fluvial, o desconfinamento lateral nas camadas sedimentares se reflete na geometria das encostas, em função das características geológicas das referidas camadas e em função da presença de mergulhos para o interior do vale.

Camadas menos rígidas (siltitos, argilitos, margas) tendem a se deformar plasticamente, enquanto camadas de materiais mais competentes (arenitos) tendem a atuar como corpo rígido, respondendo às referidas solicitações com o surgimento de juntas (fendas e trincas), em geral paralelas ao vale. Esse processo pode adquirir dimensões significativas, com as fendas alcançando dezenas de metros de altura e centenas de metros de extensão, com aberturas centimétrica a métrica. A frequência e a abertura das fendas diminuem com o afastamento do vale e com o aumento da profundidade.

A **Figura 2.7** mostra um caso típico, registrado em sedimentos das formações Furnas e Ponta Grossa, no sítio do Aproveitamento Hidrelétrico Barra do Peixe, ao longo do rio Araguaia (MT/GO), na borda noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná. No local, o rio Araguaia se aprofunda em um “canyon” e as camadas sedimentares exibem um discreto mergulho da ombreira esquerda para a direita, o que implica a presença mais acentuada de juntas de tração na primeira, do que na segunda. A seção é vista de montante para jusante.

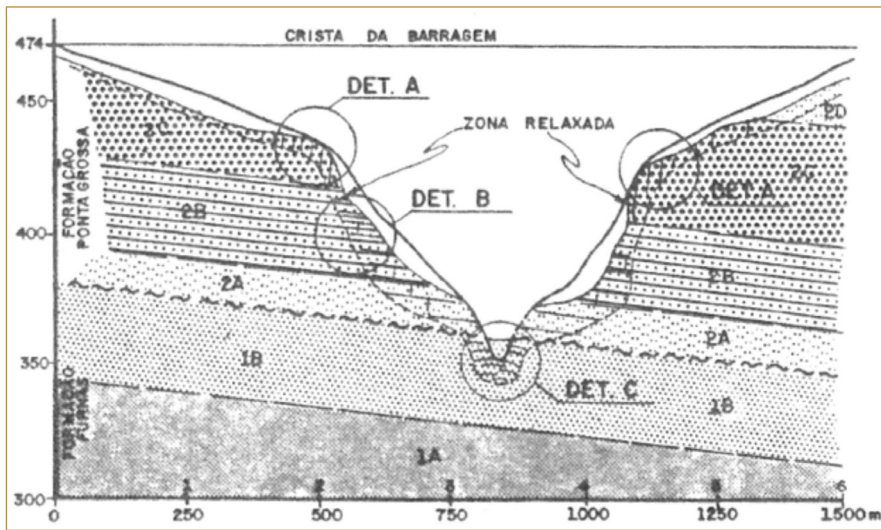


Figura 2.7 - Juntas de tração subverticais no sítio da AHE Barra do Peixe.

Fonte: Barros e Ribeiro (1990).

2.6.3 Diques clásticos

Diques clásticos são formados pelo preenchimento de fendas de tração por material inconsolidado, vindo de cima, por simples ação da gravidade. A origem das fendas de tração pode estar associada a tectonismo ou a mecanismos de alívio de tensões, como já comentado no item anterior.

Outra forma de ocorrência de diques clásticos tem sido observada na parte inferior da seção de derrames basálticos, nas vizinhanças de sua base, tendo sido atribuída a um mecanismo de injeção ascendente, em meio aquoso, a partir de um depósito de areia intertrapeano, ao longo de discontinuidades preexistentes. Neste caso, a areia pode sofrer processo de litificação, por silicificação ou por outro agente, em função da natureza dos fluidos que permeiam o derrame basáltico.

2.6.4 Juntas de cisalhamento sub-horizontais

O desconfinamento lateral produzido pelo entalhe do vale fluvial provoca, também, movimentação relativa dos estratos, ao longo de planos de acamamento ou discontinuidades sub-horizontais. Dependendo da magnitude dos deslocamentos e dos esforços envolvidos, a movimentação resulta apenas no registro

de superfícies estriadas ou pode ser acompanhada por processo de cataclase e formação de brecha, a chamada “brecha intraformacional” (**Figura 2.8**).

Os esforços horizontais podem não resultar somente de tensões laterais, mas podem ser acrescidos de uma componente induzida por neotectonismo, ou tectonismo atual, um assunto ainda não devidamente esclarecido no meio geológico-geotécnico.



Figura 2.8 - Brecha intraformacional em testemunhos de sondagem no arenito da formação Utiariti, na Chapada dos Parecis (MT).

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (2012).

2.6.5 Falhas de acavalamento (em bigode)

No fundo do vale fluvial, os esforços horizontais decorrentes do processo de alívio de tensões podem alcançar magnitude que chegue a provocar a ruptura das camadas sedimentares por cisalhamento. Essa ruptura se manifesta na forma clássica de duas superfícies de movimentação se entrecruzando e as falhas resultam inversas, visto que a “capa” se desloca sobre a “lapa”, em movimentação ascendente. A **Figura 2.9** exemplifica um caso de falhas em bigode, observadas na escavação para fundação da soleira terminal do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Isamu Ikeda (antiga Balsas Mineiro), localizada no rio das Balsas (TO). No local, que se situa na borda sudoeste da bacia do rio Parnaíba, ocorrem os arenitos de idade devoniana da formação Pimenteiras.

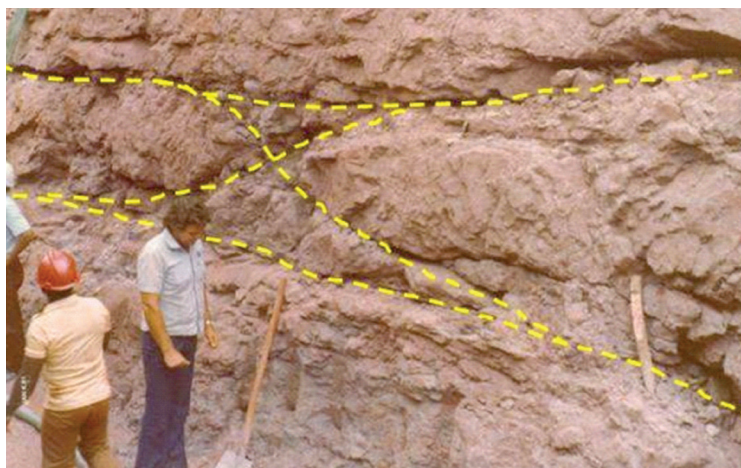


Figura 2.9 - Falhas em bigode em arenito da formação Pimenteiras, na Usina Hidrelétrica Balsas Mineiro (hoje UHE Isamu Ikeda) (TO).

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (1980).

2.6.6 Cavidades associadas a arqueamento

Em vales onde se observa a fenomenologia associada ao processo de alívio de tensões verticais e horizontais, o soerguimento do fundo do vale pode se manifestar na forma de cavidades, que nada mais são do que o espaço vazio resultante do arqueamento das camadas sedimentares, ao se deslocarem umas em relação às outras como se fossem as folhas de um livro ao ser dobrado.

2.6.7 Cavidades de lixiviação e arraste

É conhecida a suscetibilidade à erosão interna em maciços de arenito brando, sujeitos a uma rede de percolação, dando origem ao processo de *piping* – denominado “sifonamento” ou “entubamento” em português –, que será objeto de apreciação no **Capítulo 10** deste livro.

Vestígios desse processo de sifonamento podem ser encontrados, também, em maciços areníticos coerentes, que tenham adquirido características de resistência por litificação ou limonitização após terem sido submetidos a um processo de erosão interna em época anterior. A **Figura 2.10** ilustra um caso típico, observado no sítio de implantação da barragem de Piracuruca (PI), onde os sedimentos areníticos da formação Cabeças, pertencente à bacia sedimentar do rio Parnaíba,

exibiam simultaneamente sinais de limonitização – o que lhes conferiu um esqueleto resistente – e a formação de cavidades, pela remoção de partículas sólidas por arraste.



Figura 2.10 – Surgência d'água em testes de comunicabilidade em arenito da formação Cabeças, Bacia do Parnaíba (PI), percorrido por cavidades.

Fonte: Acervo fotográfico dos autores (1991).

Canais e dutos formados pela lixiviação do arenito friável podem alcançar grande distância, fato comprovado por testes de comunicabilidade, feitos despejando-se água em trincas na superfície do terreno, em cota mais alta, a dezenas de metros de distância do ponto de surgência.

REFERÊNCIAS

BARROS, E.U.A. & RIBEIRO, A.C.O. – Fenômeno de relaxação pelo entalhamento do vale na UHE Barra do Peixe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6. Salvador, 1990. **Anais**. São Paulo: ABGE. v. 1, p. 199-204.

PATTON, F.D. & HENDRON JR. A.J. – General Report on mass movements. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2. São Paulo, 1974. **Anais**. ABGE, São Paulo. v.2 Tema V. 57 p.

PETTIJOHN, F.J. – Sedimentary rocks. New York: Harper & Brothers, 1957. 2ª Edição. 718 p.

WENTWORTH, C.K. – A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 1922. 16 p.