

II.2.2.3. Síntese Conclusiva

Ao analisar os dados das várias zonas cartografadas, verifica-se que há uma alternância sistemática entre zonas monótonas pouco deformadas e corredores de cisalhamento N 130° onde a deformação é mais intensa (mapa 1 – pag. 21).

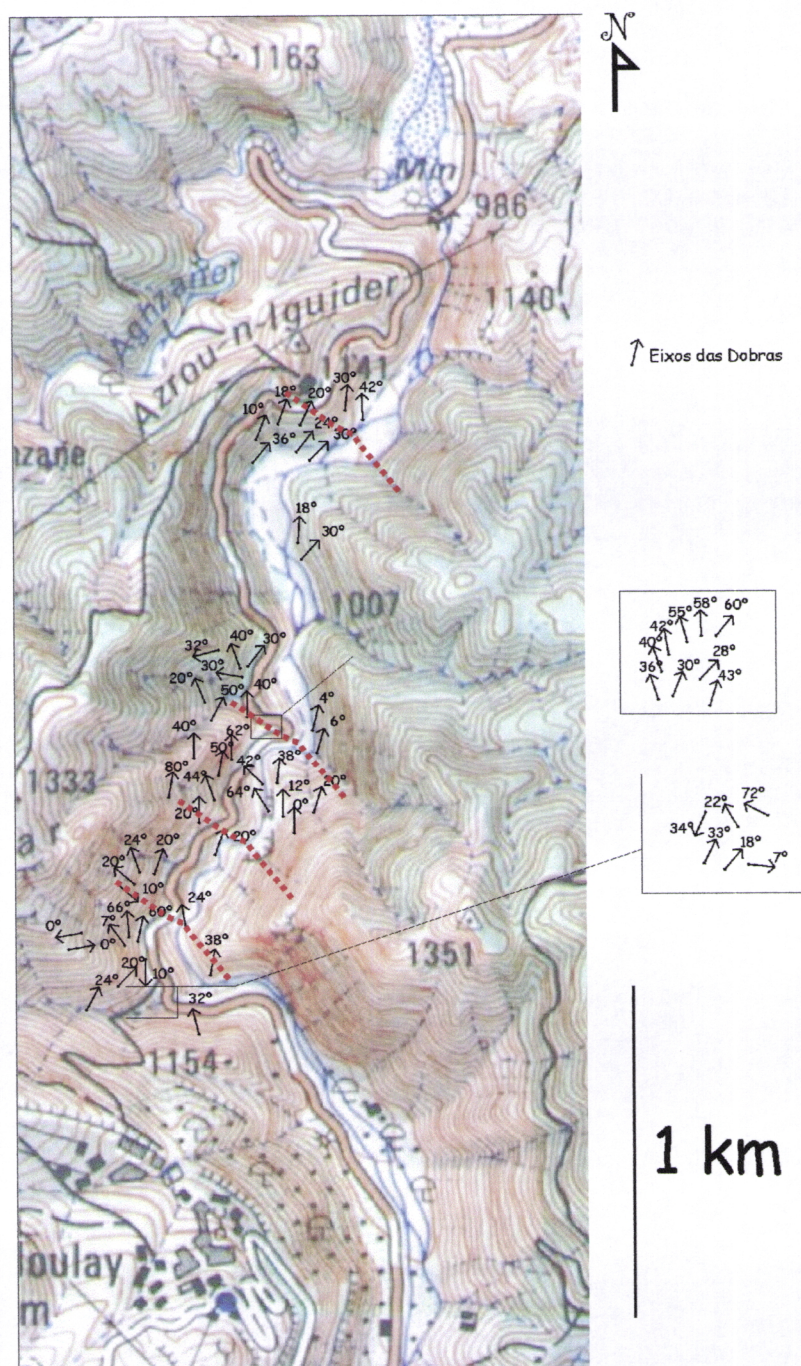
Nas áreas de menor deformação (zonas A, C, E, G e I) as sequências são monótonas, havendo no entanto alguma variação nas atitudes da estratificação – S_0 (mapa 2 – pag. 23) o que denota a existência de dobras de grande amplitude. Por vezes é possível identificar uma xistosidade de primeira fase – S_1 , no entanto esta não é na maioria das vezes visível nos afloramentos existentes, o que indica que a deformação Varisca se processou em ambientes pouco profundos.

Nas zonas de deformação mais intensa (zonas B, D, F e H) identificadas como corredores de cisalhamento (mapa 1 – pag. 21) foi possível colher dados das atitudes das várias estratificações – S_0 que estão muito dobradas.

Nestas áreas muito deformadas identificam-se zonas de diferentes graus de deformação. Na zona central dos corredores de cisalhamento a deformação foi mais dúctil estando os sedimentos muito dobrados (dobras muito apertadas) e por vezes mesmo redobrados. Nas zonas periféricas aos corredores de cisalhamento os dobramentos são de maior amplitude e estas zonas encontram-se extremamente fracturadas, estando por vezes essas fracturas preenchidas por veios de quartzo de exsudação.

Em todas as zonas dobradas foram feitas medições de eixos e planos axiais dos dobramentos (mapa 3 – pag. 55) o que, em junção com a interpretação das várias projecções estereográficas e respectivos diagramas de densidades já analisados, leva à definição de um padrão de dobramentos com planos axiais tendencialmente N-S, pendores na maioria verticais e eixos geralmente mergulhantes cerca de 20° para o quadrante Norte.

No mapa 3 verifica-se que os dobramentos de pequena amplitude correspondentes às zonas de deformação mais intensa estão perfeitamente em cima dos corredores de cisalhamento N 130°.



Mapa 3 – Representação estrutural dos eixos das dobras nas zonas estudadas, a vermelho tracejado vemos os corredores de cisalhamento N 130°.

Nas áreas envolventes aos corredores de cisalhamento N 130° existem associados veios de quartzo de exsudação, os quais na sua maioria apresentam duas direcções preferenciais (N 60-80° E e N 10-30° E) que podem ser facilmente explicadas como fracturas do tipo ridel e antirridel (figura 53).

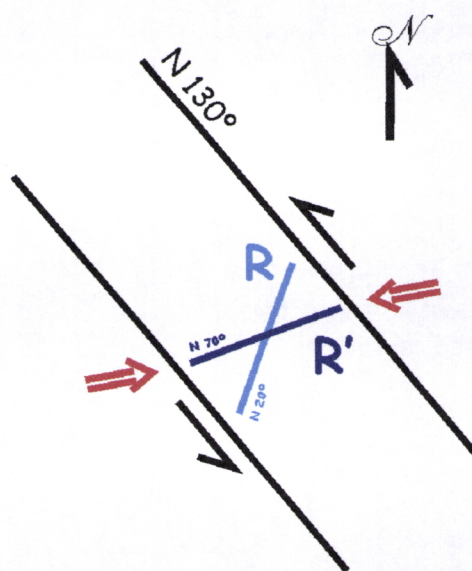


Figura 53 – Esquema de Ridel (N 20°) e Antirridel (N 70°) que explicam o padrão de fracturação existente mediante o campo de tensões WNW-ESE (a vermelho).

Segundo a evolução conhecida do Varisco da região do Alto Atlas Ocidental e do Viseano da planície do Haouz de Marrakech (Boummane, 1987) existiu uma primeira fase de deformação D_1 , na qual foram formados dobramentos de grande amplitude e de plano axial N-S associados a desligamentos direitos de direcção aproximada N 50-70° E (figura 54) sob tensões compressivas máximas (σ) com orientações próximas de WNW-ESE. No geral estes sedimentos têm xistosidade associada (figura 54 A) o que não acontece no caso da maioria dos sedimentos da zona cartografada em Zawiat Moulay Brahim o que faz pensar que esta zona estaria enquadrada num andar estrutural mais alto (figura 54 B). Estes acidentes ENE-WSW (marcados na figura 54 como N 50 – 70° E) correspondem ao rejogo de anisotropias Pré-câmbricas, uma das quais é a falha de Tizi N' Test.

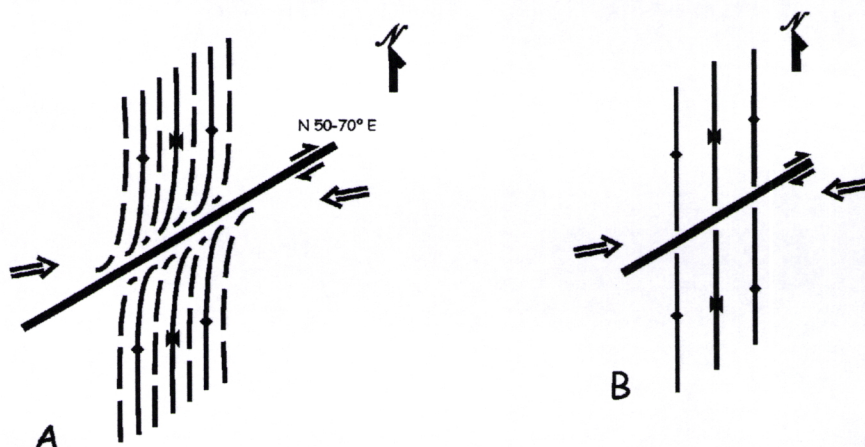


Figura 54 – Primeira fase de deformação D_1 precoce na região do Alto Atlas Ocidental e da planície do Haouz de Marrakech. A – Caso geral de deformação D_1 . B – Deformação num andar estrutural mais alto, típica do maciço de Foudrar e do sector oriental de Souktana.

Ainda na primeira fase de deformação Varisca mas mais tardiamente desenvolveram-se os corredores de cisalhamento esquerdos de direcção $N 50^\circ W$ ou $N 130^\circ$ (figura 55) que vieram novamente deformar os sedimentos. Assim são possíveis duas situações de deformação; uma num andar estrutural mais baixo com deformação mais dúctil (figura 55 A) e outra num andar estrutural mais alto com deformação mais frágil (figura 55 B).

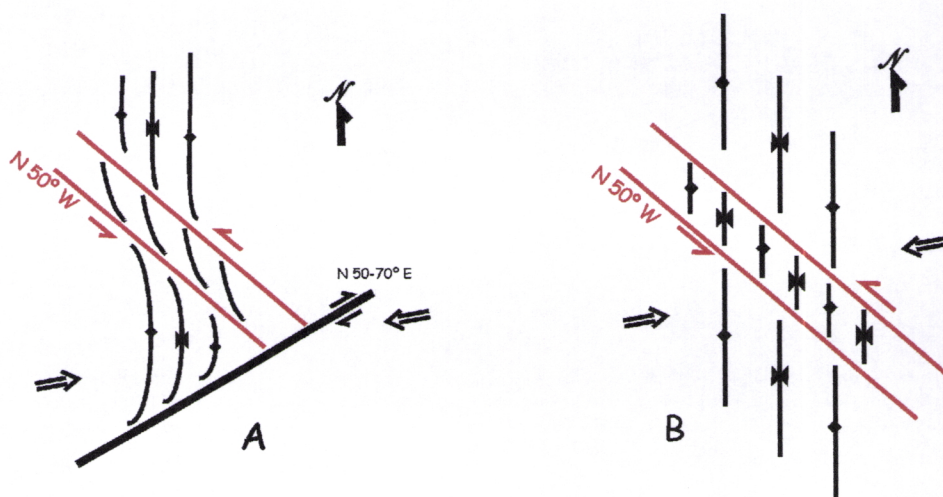


Figura 55 – Primeira fase de deformação D_1 tardia, na região do Alto Atlas Ocidental e da planície do Haouz de Marrakech. A – Caso geral de deformação D_1 tardia. B – Deformação num andar estrutural mais alto, típica de Zawiat Moulay Brahim.

A partir das perspectivas de evolução da região do Alto Atlas Ocidental, da planície do Haouz de Marrakech e dos modelos descritos nas figuras anteriores, vai tentar integrar-se a zona de trabalho nestes modelos, de modo a compreender como e porquê se tem o padrão de deformação lá existente.

Os corredores de cisalhamento cartografados na área de Zawiat Moulay Brahim são esquerdos e podem ser atribuídos aos estádios mais tardios da primeira fase de deformação Varisca (confrontando com trabalhos efectuados no âmbito do protocolo de cooperação entre as Universidades de Évora – Portugal, e de El Jadida - Marrocos).

Além disso, verifica-se que:

- Existe uma componente forte e visível de deformação frágil que se traduz por uma fracturação muito bem desenvolvida, por vezes preenchida por veios de quartzo de exsudação (figuras 32 e 34 – zona F; figuras 37, 38, 48, 49 e 50 – zona H) e que pode ser explicada pela figura 53 – ridel e antirridel.
- Os dobramentos mantêm na sua grande generalidade, quer nas zonas monótonas, quer nas zonas de deformação intensa (corredores de cisalhamento), planos axiais de direcção N-S e eixos mergulhantes de cerca de 20° para Norte.

Nas zonas consideradas monótonas (zona A, C, E, G e I) o que na realidade se tem são dobramentos de grande amplitude com eixos de baixos ângulos mergulhantes para Norte e planos axiais N-S (figura 56), como se verifica através dos estereogramas das figuras 14 (zona C), 35 (zona G) e 51 (zona I).

Nas zonas de corredores de cisalhamento onde a deformação é muito intensa (zonas B, D, F e H), as atitudes preferenciais dos dobramentos mantêm-se na sua maioria com planos axiais N-S e eixos mergulhantes para Norte, sendo no

entanto dobramentos heterogêneos, muito apertados de pequena amplitude (figura 56).

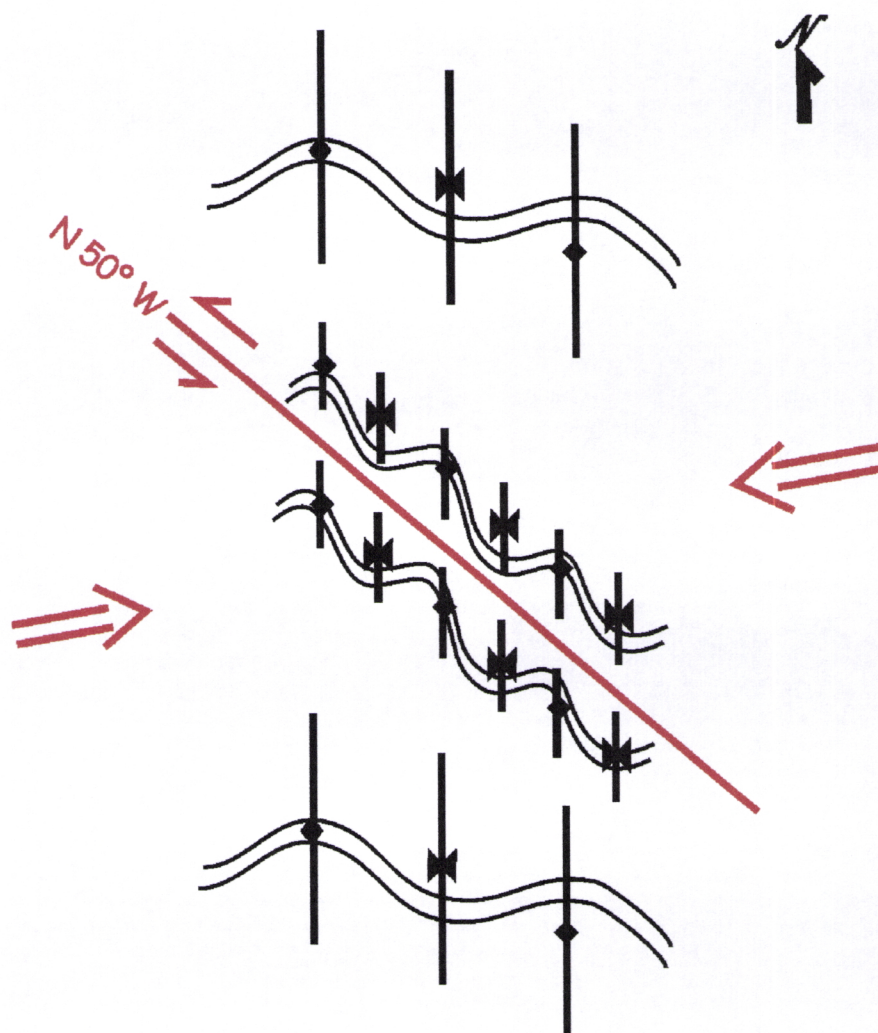


Figura 56 – Esquema ilustrativo da situação estrutural presente em Zawiya Moulay Brahim, onde os dobramentos apresentam planos axiais N-S, mas variam de amplitude conforme se encontram ou em cima de corredores de cisalhamento ou em zonas mais monótonas.

Isto mostra claramente que as dobras N-S e os cisalhamentos esquerdos são contemporâneos, pois a intensidade dos dobramentos aumentou com a aproximação das zonas de cisalhamento. Além disto as dobras N-S confirmam a componente esquerda do movimento.

Estes factores permitem-nos concluir que estamos numa situação de evolução equivalente à D_1 tardia da figura 55 B, isto é, uma situação onde a deformação é mais frágil dado estarmos perante um andar estrutural mais alto, com dobramentos e cisalhamentos simultâneos e de movimentação esquerda.

Para tentar compreender melhor este padrão foram criados vários modelos transpressivos no Laboratório de Tectónica Experimental que pretendiam permitir a percepção da influência de anisotropias anteriores na génese de dobramentos em zonas de cisalhamento.

II.3. Modelação Analógica

II.3.1. Introdução

Para tentar compreender a relação entre os dobramentos a sublinhar zonas de cisalhamento N 130° esquerdos na área estudada em Zawiat Moulay Brahim, fizeram-se experiências de modelação analógica impondo um sistema transpressivo ao material escolhido para simular as rochas do soco e da cobertura.

As dobras são estruturas comuns tanto em sistemas convergentes como em sistemas transcorrentes, sendo a sua rotação ou qualquer outro factor possível de calcular a partir do conhecimento da orientação original e da quantidade de cisalhamento.

A prensa utilizada para a realização dos modelos analógicos pode ser vista como um sistema de cisalhamento puro e cisalhamento simples. No cisalhamento simples o factor de cisalhamento puro desaparece, e no cisalhamento puro desaparece o factor de cisalhamento simples.

As contribuições relativas do cisalhamento simples e do cisalhamento puro podem ser expressas em termos de ângulo de convergência (α); quando α é igual a zero há transcorrência, e quando α é igual a 90° então há convergência ortogonal (figura 57).

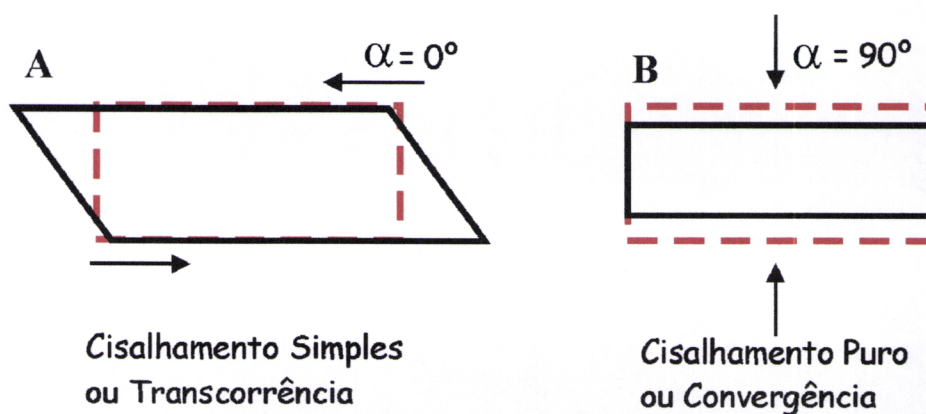


Figura 57 – Modelos de Cisalhamentos, a tracejado vermelho a situação inicial, e a preto o estado final. A – Cisalhamento simples ou transcorrência, com $\alpha = 0^\circ$. B – Cisalhamento puro ou convergência ortogonal, com $\alpha = 90^\circ$.

Então, no sistema modelado criaram-se condições para induzir um sistema transpressivo, o qual se refere à situação em que as fronteiras das placas ao longo da zona transcorrente se aproximam obliquamente (figura 58).

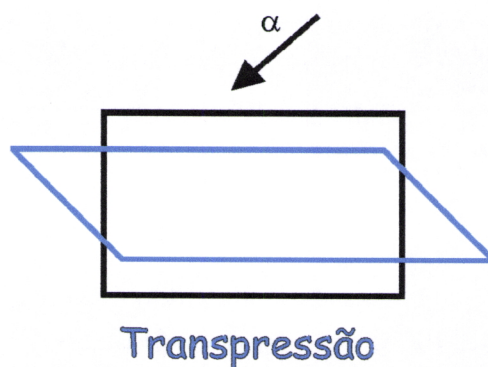


Figura 58 – Modelo de Transpressão induzido no Laboratório de Tectónica Experimental e Microtectónica da Universidade de Évora. A preto o modelo original e a azul o modelo que sofreu deformação transpressiva.

Nestas experiências desprezou-se a deformação junto aos bordos do modelo de modo a eliminar a deformação induzida pelas paredes da prensa.

II.3.2. Equipamento

Para realizar as experiências de modelação analógica no Laboratório de Tectónica Experimental e Microtectónica da Universidade de Évora, foi utilizada uma prensa que permite fazer experiências de cisalhamento simples, de cisalhamento puro e de transpressão com diversos ângulos de convergência.

Esta prensa é composta por um eixo de rotação (fuso) que está ligado a um motor com rotação de aproximadamente 10 rpm (rotações por minuto) que lhe impõe uma determinada tensão. Este eixo imprime ao bloco um movimento transcorrente, convergente, transpressivo ou transtensivo, consoante o ângulo de convergência (α) e o sentido da rotação que lhe for aplicado.

O bloco onde se encontra o material a ser deformado é simulado por uma caixa de acrílico que tem 22,2 cm de comprimento e 14,9 cm de largura e é constituído por uma parede fixa e três paredes móveis. À parede paralela à parede fixa é imposta uma tensão transpressiva utilizada para os modelos que se querem simular (figura 59).



Figura 59 – Esquema no plano horizontal da prensa utilizada para induzir ao modelo uma deformação transpressiva. À esquerda vê-se o modelo antes da deformação e à direita o modelo depois de deformado com tensões transpressivas.

α – Ângulo de convergência.; ψ – Cisalhamento angular.

A – Parede fixa.

B – Paredes móveis.

II.3.3. Materiais e Metodologia

Em todos os modelos simulados existiu uma camada inferior de silicone que tendia, não só a simular o soco, mas também a homogeneizar a tensão que era aplicada ao modelo pela movimentação das paredes. Sobre o silicone era colocada uma camada de plasticina que simulava a cobertura na qual se iam desenvolver as dobras. Utilizou-se ainda uma folha de acetato para simular uma anisotropia.

As espessuras de ambos os materiais são diferentes; o silicone que simula o soco tem 1,8 cm e a plasticina que simula a cobertura tem 2 mm. Ambos têm a largura e o comprimento do modelo.

Estes materiais são colocados cuidadosamente dentro da prensa, podendo então dar-se início às experiências.

O tempo aproximado que cada experiência demora são cerca de 10 minutos para 35° de cisalhamento angular (ψ) e 15 minutos quando o cisalhamento angular atinge 60°.

Realizaram-se modelações com ângulos de convergência ou ângulos de transpressão (α) diferentes, uma vez que estes podem ser alterados mediante o tipo de experiência que se queira realizar. Deste modo o tipo de transpressão efectuada foi para dois ângulos de convergência; um α de 45° (transpressão com componentes idênticos de cisalhamento simples e de cisalhamento puro) e outro de 22,5° (transpressão com maior componente de cisalhamento simples e menor de cisalhamento puro). Estes ângulos foram escolhidos para avaliar o diferente tipo de comportamento dos dobramentos mediante tipos de transpressão distintos.

As medidas que se pretendem determinar ao longo das várias experiências são o ângulo de cisalhamento angular (ψ) que é variável com o tempo, os ângulos com que se formam os dobramentos (β) e a sua rotação ao longo da evolução da deformação transpressiva.

II.3.4. Transpressão com ângulo de convergência de 45°

II.3.4.1. Introdução

Para um ângulo de convergência de 45° foram realizados 3 tipos de experiências diferentes.

O primeiro tipo de modelação foi realizado sem anisotropias (figura 60 A), de modo a observar o comportamento dos materiais perante uma situação de transpressão homogénea.

Nas experiências do segundo tipo foi colocada uma anisotropia paralelamente à parede fixa, exactamente a meio da prensa de cisalhamento (figura 60 B). A anisotropia em questão corta o silicone, mas não se encontra fixa a nada, motivo pelo qual virá a ser susceptível de rodar. Pretendia-se analisar se a influência da anisotropia seria factor despoletante para a existência de partição da deformação ou se a transpressão se manteria homogénea.

Por fim no terceiro tipo de experiências também é colocada uma anisotropia no silicone mas esta fica numa posição oblíqua com o modelo rectangular da prensa. Na realidade este tipo divide-se em dois; um em que a anisotropia é colocada sub-paralelamente à direcção de compressão e faz um ângulo de 35° com a parede fixa (figura 60 C); e outro em que a anisotropia é colocada sub-perpendicularmente à direcção de compressão, ou seja, ela faz um ângulo de 35° com a parede fixa mas na direcção perpendicular ao eixo de convergência (figura 60 D).

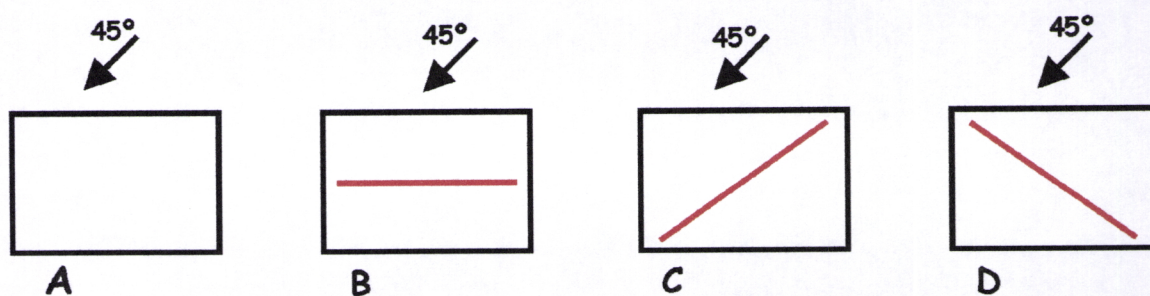


Figura 60 – Modelos dos diferentes tipos de experiências de transpressão com ângulo de convergência de 45°. Anisotropia representada a vermelho.

A – Modelo sem anisotropia.

B – Modelo com anisotropia paralela à parede fixa (parede inferior do modelo).

C – Modelo com anisotropia de direcção sub-paralela ao eixo de convergência.

D - Modelo com anisotropia de direcção sub-perpendicular ao eixo de convergência.

De cada um destes modelos analógicos foram realizadas várias experiências para controlar a reprodutividade dos resultados. No entanto, como os resultados dentro de cada tipo eram muito semelhantes entre si, optou-se por ilustrar e interpretar a experiência mais significativa em cada um desses modelos.

II.3.4.2. Experiências sem anisotropia

Realizaram-se 3 experiências de transpressão com ângulo de convergência de 45° sem anisotropia (figura 60 A), mas a mais significativa é a representada na figura 61, a partir da qual se fez a interpretação dos dados.

Os dobramentos começam a formar-se por volta dos 5° de cisalhamento angular com um ângulo β de 20°, e com o aumento progressivo da transpressão tendem a diminuir o seu ângulo rodando até paralelizarem com a parede fixa da prensa. Este paralelismo acontece a cerca de 35° de cisalhamento angular, momento a partir do qual as dobras deixam de rodar (figuras 61 e 62).

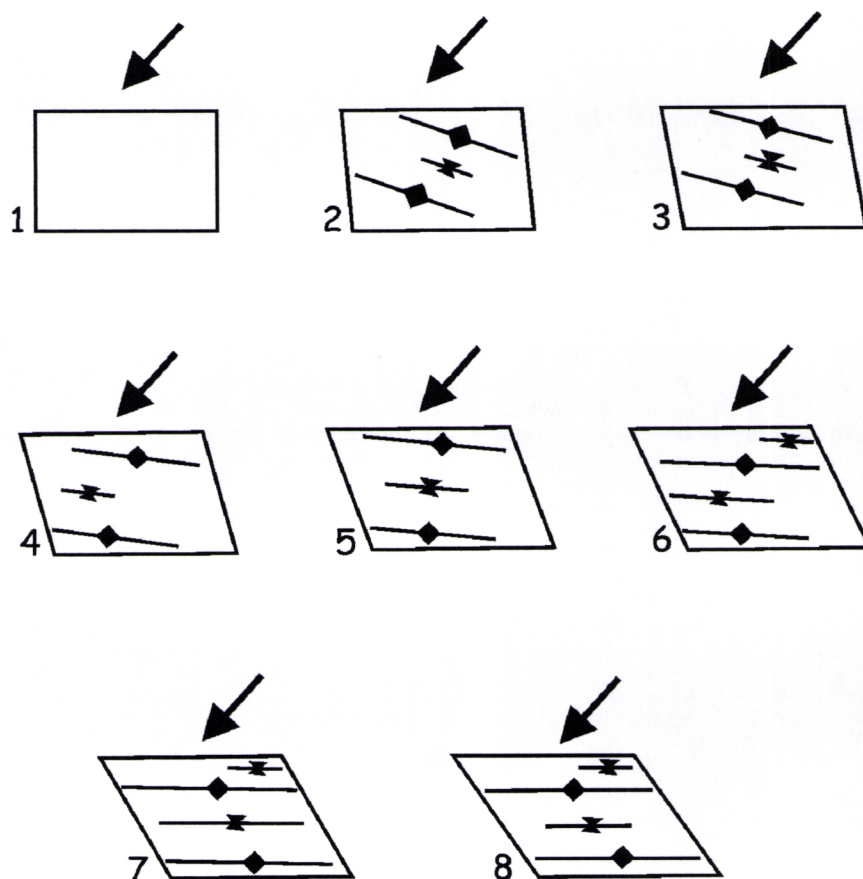


Figura 61 – Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de 45° , sem anisotropia.

1 – Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$

2 - $\psi = 5^\circ$; $\beta = 20^\circ$.

3 - $\psi = 10^\circ$; $\beta = 15^\circ$.

4 - $\psi = 15^\circ$; $\beta = 9^\circ$.

5 - $\psi = 20^\circ$; $\beta = 6^\circ$.

6 - $\psi = 25^\circ$; $\beta = 4^\circ$.

7 - $\psi = 30^\circ$; $\beta = 2^\circ$.

8 - $\psi = 35^\circ$; $\beta = 0^\circ$.

A partir dos 35° deixa de fazer sentido prolongar a experiência já que estamos perante a deformação transpressiva máxima para se poder observar o comportamento do material.

Âng. Cisal. Angular (ψ)	Âng. Dobramentos (β)
5	20
10	15
15	9
20	6
25	4
30	2
35	0

Figura 62 – Tabela de valores de cisalhamento angular (ψ) e respectivos ângulos das dobras (β) em experiências com ângulo de convergência de 45° sem anisotropia.

Num sistema transpressivo é de esperar que as dobras se formem com eixos orientados a menos de 45° com a parede fixa (figura 62 e 63), havendo rotação dos eixos das dobras com o seu desenvolvimento progressivo (Sanderson & Marchini, 1984).

A quantidade relativa de rotação das dobras decresceu com o aumento da convergência.

Neste modelo a transpressão é homogênea sem partição da deformação, isto traduz-se pelo paralelismo entre os dobramentos formados.

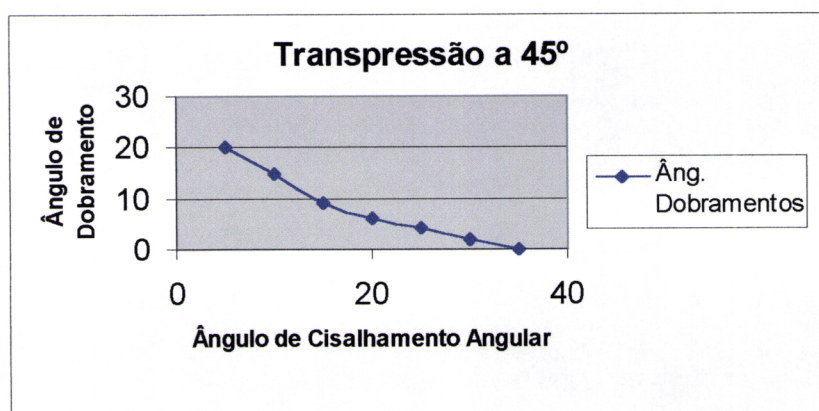


Figura 63 – Gráfico da variação dos dobramentos formados num sistema transpressivo com ângulo de convergência de 45° e sem anisotropia.

II.3.4.3. Experiências com anisotropia paralela à parede fixa

Foram feitas várias repetições deste tipo de experiências (figura 60 B) e pôde verificar-se que nelas se formam dobras com dois tipos diferentes de orientação (figura 64).

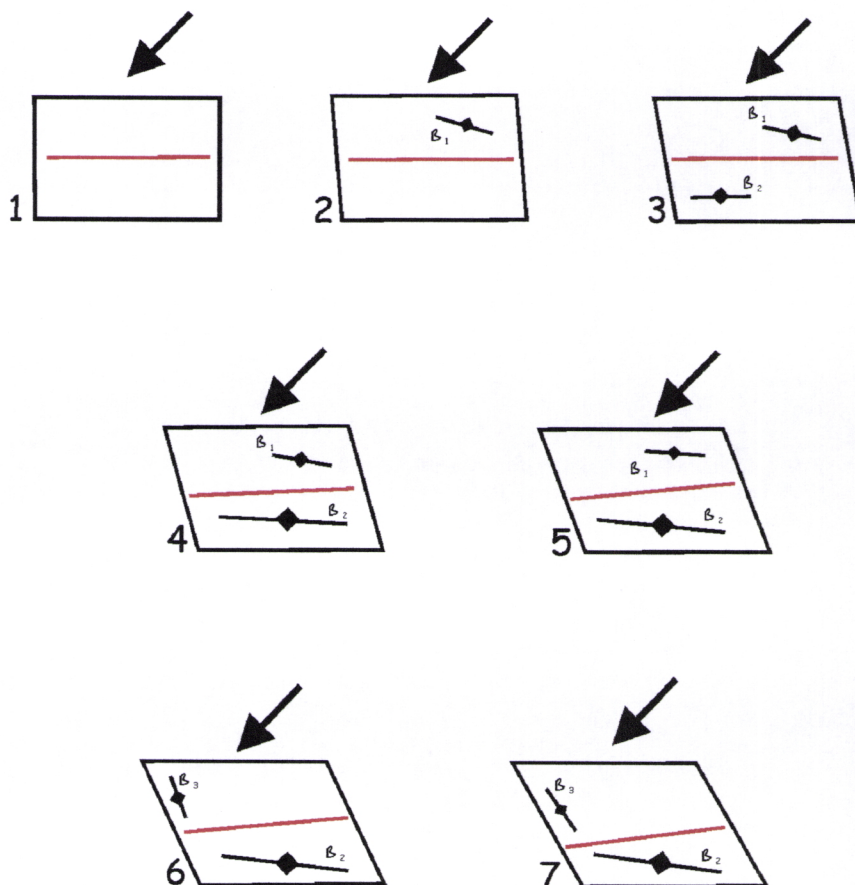


Figura 64 - Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de 45° , com anisotropia paralela às paredes horizontais da prensa. Anisotropia representada a vermelho.

1 - Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$

2 - $\psi = 5^\circ$; $\beta_1 = 15^\circ$.

3 - $\psi = 10^\circ$; $\beta_1 = 12^\circ$; $\beta_2 = 0^\circ$.

4 - $\psi = 15^\circ$; $\beta_1 = 8^\circ$; $\beta_2 = 4^\circ$.

5 - $\psi = 20^\circ$; $\beta_1 = 5^\circ$; $\beta_2 = 6^\circ$.

6 - $\psi = 25^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 7^\circ$; $\beta_3 = 25^\circ$.

7 - $\psi = 30^\circ$; $\beta_1 = \text{sem significado}$; $\beta_2 = 7^\circ$; $\beta_3 = 30^\circ$.

Estabelecendo como referencial o Norte para a parte superior da folha de papel, então no sector a Norte da anisotropia os dobramentos têm o mesmo comportamento das experiências sem anisotropia, isto é, a dobra inicial tem a mesma tendência para diminuir o ângulo entre o seu eixo e as fronteiras da prensa transpressiva à medida que o cisalhamento angular aumenta.

Neste caso a primeira dobra a formar-se apresenta um ângulo de 15° e não de 20° como nas experiências sem anisotropia, o que pode acontecer devido ao facto da área em questão ser menor aqui do que a área total da experiência sem anisotropia, logo o efeito da transpressão será diferente. Quanto menor a área, menor o ângulo com que o dobramento se forma.

Em relação ao sector a Sul da anisotropia, só começam a formar-se dobramentos aos 10° de cisalhamento angular e estes fazem um ângulo de 0° com a fronteira da prensa, isto é, são paralelos à parede fixa, tendo tendência para aumentarem rodando o seu eixo (figura 64), esta rotação pode ser devida a problemas de espaço.

Esta diferenciação pode ter origem devido à presença da anisotropia que vai surtir um efeito de partição da deformação, embora a própria anisotropia também sofra rotação (figura 65 – 1 e 2).

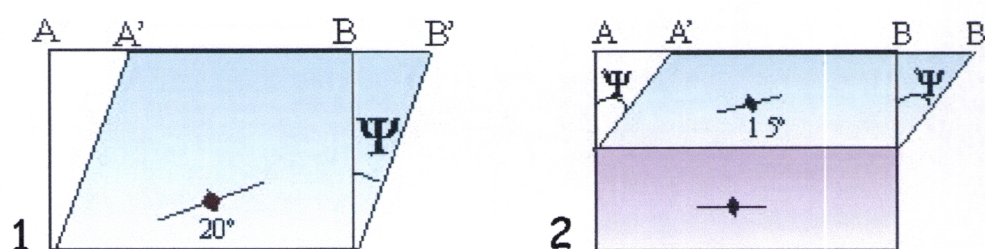


Figura 65 – Esquema que permite compreender a diferenciação entre os modelos sem anisotropia e com anisotropia.

- 1 – Formação de dobras em sistemas transpressivos sem anisotropia.
- 2 – Formação de dobras em sistemas transpressivos com partição da deformação.

Há que ter em conta o facto de não se estar a trabalhar com cisalhamento simples mas sim com transpressão, ou seja, nestas experiências existe uma componente de cisalhamento simples que provoca transcorrência e uma componente de cisalhamento puro que provoca convergência. Isto faz com que a formação das dobras não seja tão simples como a exposta na figura 65, pois além de o material sofrer transcorrência ele vai sofrer também um encurtamento o que cria problemas de espaço.

Então, é natural que os dobramentos formados a Norte da anisotropia tenham o mesmo comportamento das experiências sem anisotropia, mas como ela própria também sofre rotação e ao mesmo tempo compressão, a dobra vai paralelizar mais cedo, isto é, com um cisalhamento angular de 25° o dobramento já não tem significado (figuras 66 e 67).

Como existe partição da deformação imposta pela anisotropia os dobramentos a Sul desta têm tendência a formarem-se mais tarde e a apresentarem-se de um modo paralelo à parede fixa da prensa, uma vez que sofrem menor influência do cisalhamento simples. À medida que a anisotropia roda com o aumento do cisalhamento angular vai existir um problema de espaço que obriga este dobramento a rodar (figuras 66 e 67). Deste modo, a anisotropia parece absorver quase totalmente a componente de cisalhamento simples.

Âng. Cisal. Angular (ψ)	Âng. Dobramento (β_1)	Âng. Dobramento (β_2)
5	15	
10	12	0
15	8	4
20	5	6
25	0	7
30		7

Figura 66 – Tabela de valores de cisalhamento angular (ψ) e respectivos ângulos das dobras (β) em experiências com ângulo de convergência de 45° e anisotropia paralela à parede fixa da prensa.

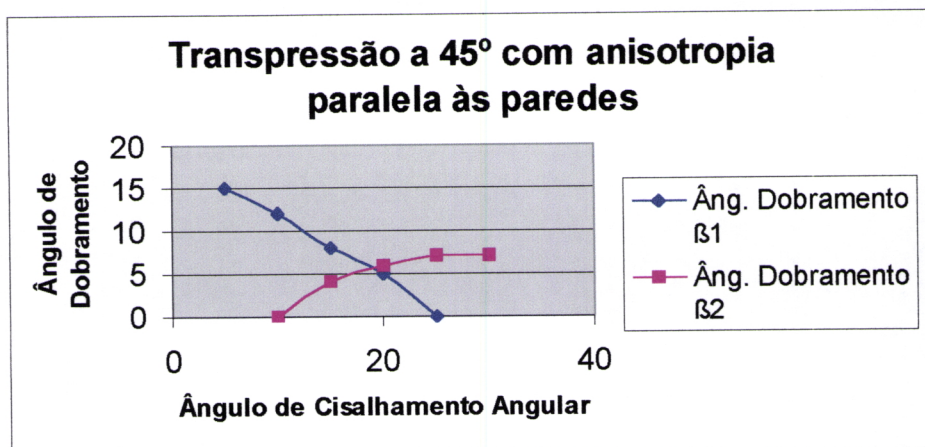


Figura 67 – Gráfico da variação dos dobramentos (β) formados em transpressão a 45° com anisotropia paralela à parede fixa da prensa. A azul – primeiro dobramento (a Norte da anisotropia). A rosa – segundo dobramento (a Sul da anisotropia).

II.3.4.4. Experiências com anisotropia a 35° da parede fixa

II.3.4.4.1. No sentido “sub-paralelo” à direcção de compressão

Esta sequência de experiências foi realizada com a anisotropia sub-paralela à direcção de compressão, isto é, a fazer um ângulo de 35° com a parede fixa do modelo da prensa transpressiva, tendo sido escolhida a representação mais significativa (figura 68).

Mantendo o referencial utilizado nas experiências anteriores (ponto II.3.4.3) de Norte da anisotropia (por cima desta) e Sul da anisotropia (por baixo desta) podem separar-se os dobramentos formados durante o decorrer da experiência.

A primeira dobra (β_1) formada a 5° de cisalhamento angular aparece na parte a Sul da anisotropia e faz um ângulo de 10° entre o seu eixo e as fronteiras da

prensa, tendo tendência a aumentar com o aumento do cisalhamento angular e com a rotação da anisotropia (figuras 68, 69 e 70).

Esta rotação da anisotropia inicia-se aos 15° de cisalhamento angular e termina aos 25° , pois fica presa de encontro à parede fixa da prensa e impossibilitada de sofrer novas rotações (figuras 69 e 70).

Com um cisalhamento angular de 20° inicia-se a formação de outros dois dobramentos (β_2), um no sector a Sul da anisotropia e outro no sector a Norte da anisotropia, de baixo ângulo que tendem a paralelizar (figuras 68, 69 e 70).

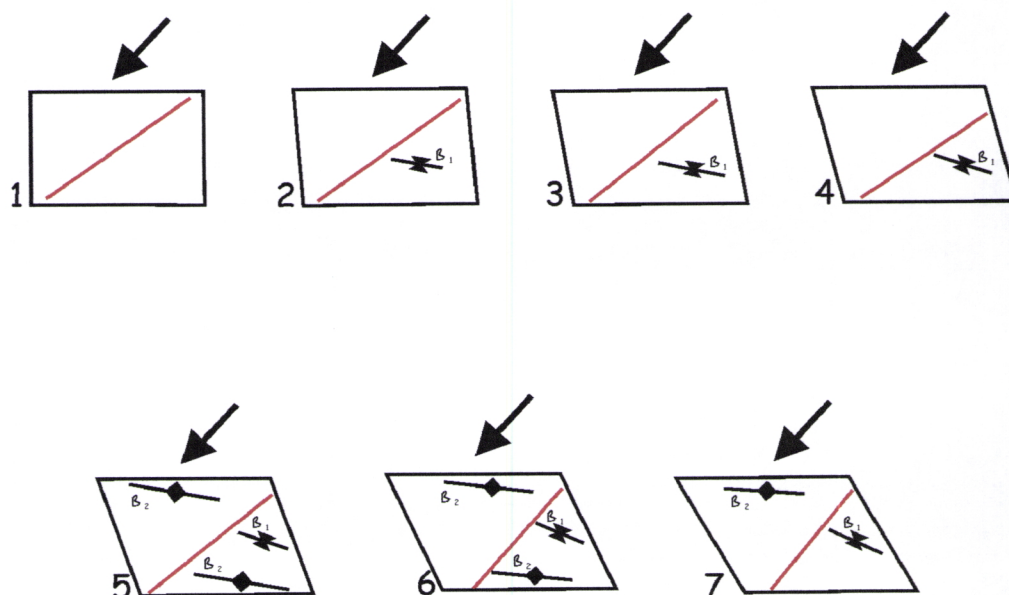


Figura 68 - Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de 45° , com anisotropia oblíqua, sub-paralela à direcção de compressão. Anisotropia representada a vermelho.

1 - Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$

2 - $\psi = 5^\circ$; $\beta_1 = 10^\circ$; Sem Rotação da Anisotropia (R_A).

3 - $\psi = 10^\circ$; $\beta_1 = 12^\circ$; Sem R_A .

4 - $\psi = 15^\circ$; $\beta_1 = 15^\circ$; $R_A = 22^\circ$.

5 - $\psi = 20^\circ$; $\beta_1 = 19^\circ$; $\beta_2 = 10^\circ$; $R_A = 30^\circ$.

6 - $\psi = 25^\circ$; $\beta_1 = 23^\circ$; $\beta_2 = 10^\circ$; $R_A = 32^\circ$.

7 - $\psi = 30^\circ$; $\beta_1 = 25^\circ$; $\beta_2 = 10^\circ$; R_A sem variação.

Âng. Cisal. Angular (ψ)	Âng. Dobramento (β_1)	Âng. Dobramento (β_2)	Rotação da Anisotropia
5	10		Sem rotação
10	12		Sem rotação
15	15		26
20	19	10	30
25	23	7	32
30	25	4	Sem variação

Figura 69 – Tabela dos valores dos dobramentos e rotação da anisotropia em transpressão a 45° ; com anisotropia oblíqua, sub-paralela à direcção de compressão.

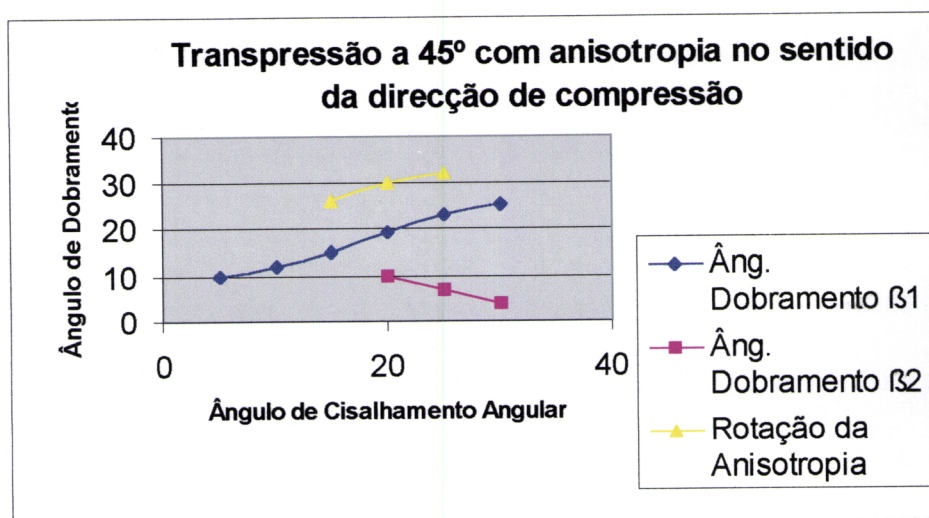


Figura 70 – Gráfico da evolução dos dobramentos (β) e da rotação da anisotropia (R_A) aumento progressivo do cisalhamento angular (ψ), em transpressão a 45° com anisotropia oblíqua, sub-paralela à direcção de compressão.

Os dobramentos β_1 são formados no sector a Sul da anisotropia por uma questão de falta de espaço devida à compressão exercida, e os dobramentos β_2 quer a Norte quer a Sul da anisotropia formaram-se paralelamente entre si. Isto significa que a anisotropia não particiona a deformação, sendo esta homogénea. Logo a transpressão também é homogénea nesta experiência.

II.3.4.4.2. No sentido “sub-perpendicular” à direcção de compressão

Neste modelo de experiências colocou-se a anisotropia sub-perpendicular ao sentido da direcção de compressão, ou seja, ela faz um ângulo de 35° com a parede fixa da prensa transpressiva.

Foi escolhida a experiência representada pela figura 71 dado ser a mais significativa.

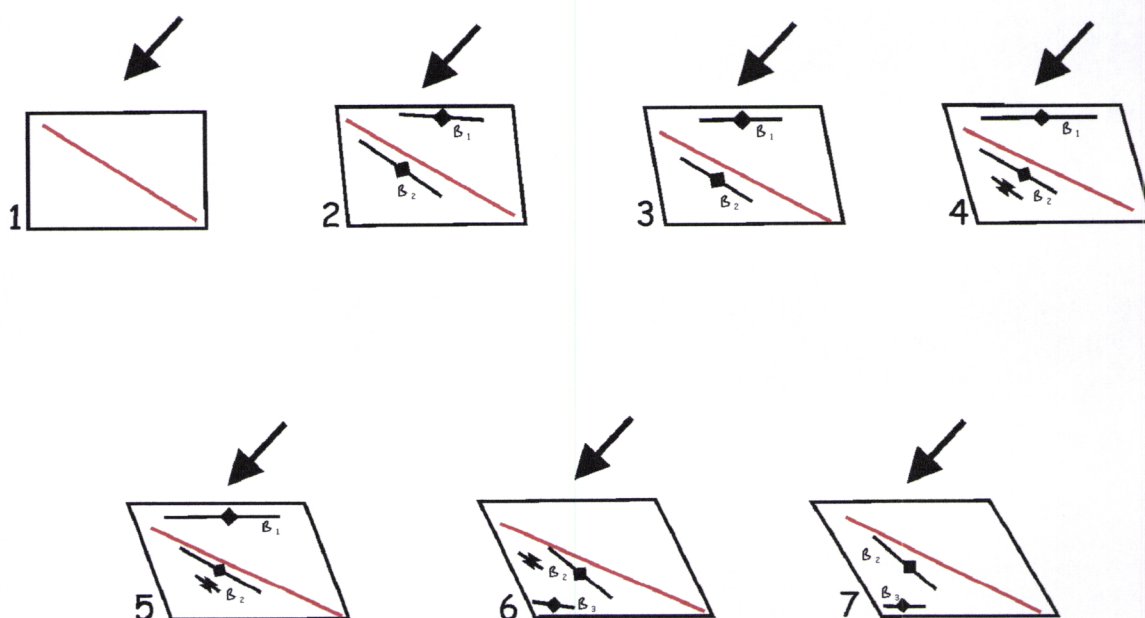


Figura 71 - Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de 45° , com anisotropia oblíqua sub-perpendicular à direcção de compressão. Anisotropia representada a vermelho.

- 1 - Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$
- 2 - $\psi = 5^\circ$; $\beta_1 = 3^\circ$; Sem Rotação da Anisotropia (R_A).
- 3 - $\psi = 10^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 32^\circ$; $R_A = 32,5^\circ$.
- 4 - $\psi = 15^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 30^\circ$; $R_A = 30^\circ$.
- 5 - $\psi = 20^\circ$; β_1 = Sem significado; $\beta_2 = 35^\circ$ (eixo inclinado); R_A sem variação.
- 6 - $\psi = 25^\circ$; β_1 = Sem significado; $\beta_2 = 38^\circ$; $\beta_3 = 10^\circ$; R_A sem variação.
- 7 - $\psi = 30^\circ$; β_1 = Sem significado; $\beta_2 = 41^\circ$; $\beta_3 = 0^\circ$; R_A sem variação.

Os dobramentos (β_1) formados inicialmente no sector a Norte da anisotropia (referencial utilizado no ponto II.3.4.4.1) fazem um baixo ângulo – 3° entre o seu eixo e as fronteiras da prensa, o qual paraleliza aos 10° de cisalhamento angular e assim se mantém apenas sofrendo inclinação do plano axial, mas este não foi sujeito a medições (figuras 71 e 72).

No sector a Sul da anisotropia formam-se dois tipos de dobras; as dobras iniciais (β_2) começam com um ângulo de 32° entre o seu eixo e as fronteiras da prensa e tendem a aumentar progressivamente; e as dobras finais (β_3) que se formam com um ângulo de 10° e tendem a paralelizar (figuras 71, 72 e 73).

Isto resulta essencialmente de um problema de falta de espaço gerado pela presença da anisotropia e da sua rotação.

Verifica-se então que os dobramentos formados a Norte da anisotropia têm uma orientação completamente diferente dos formados a Sul da mesma anisotropia.

Logo a anisotropia actua particionando a deformação e dividindo o mesmo modelo em dois blocos com comportamentos distintos, por isso conclui-se que estamos perante um modelo de transpressão com partição da deformação.

Âng. Cisal. Angular (ψ)	Âng. Dobramento β_1	Âng. Dobramento β_2	Rotação da Anisotropia
5	3	35	Sem rotação
10	0	32	32
15	0	30	30
20	Sem significado	35	30
25	Sem significado	38	30
30	Sem significado	41	30

Figura 72 – Tabela com os valores dos dobramentos (β_1 , β_2) e rotação da anisotropia em função do cisalhamento angular (ψ), em transpressão a 45° ; com anisotropia oblíqua, sub-perpendicular à direcção de compressão.

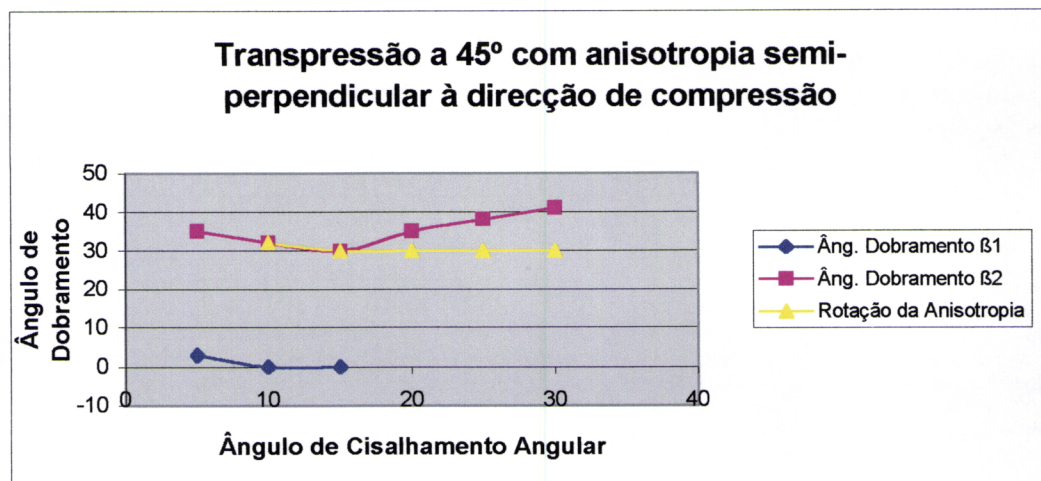


Figura 73 – Gráfico da evolução dos dobramentos e da rotação da anisotropia em função do aumento do cisalhamento angular, em transpressão a 45° com anisotropia oblíqua, sub-paralela à direcção de compressão.

II.3.5. Transpressão com ângulo de convergência de 22,5°

II.3.5.1. Introdução

Nesta sequência de experiências mudou-se o ângulo de convergência para 22,5° isto é, agora a componente de cisalhamento simples é maior que a componente de cisalhamento puro. Para este ângulo de convergência realizaram-se também vários modelos.

O primeiro modelo (figura 74 A) simula uma transpressão homogênea sem anisotropia, por forma a observar qual o ângulo de formação de dobramentos em transpressão a 22,5°, e se este é maior ou menor que em transpressão a 45° (ponto II.3.4.2).

No segundo modelo foi colocada uma anisotropia paralelamente à parede fixa, a meio da prensa de cisalhamento (figura 74 B). Esta anisotropia corta o silicone e poderá ser susceptível de rodar dado não se encontrar fixa. Pretendia-se analisar qual a influência da anisotropia, se apesar do baixo ângulo de convergência ela ainda seria factor despoletante de partição da deformação ou se a transpressão seria homogénea.

O terceiro modelo de experiências também foi realizado com uma anisotropia no silicone mas esta fica numa posição oblíqua com o modelo rectangular da prensa (figura 74 C – a anisotropia é colocada sub-paralelamente à direcção de compressão e faz um ângulo de 35° com a parede fixa).

Na realidade este último modelo (figura 74 C) não teve resultados significativos e nem passíveis de interpretação, já que só se formaram pequenos dobramentos apenas influenciados pelo movimento deslizante das paredes da prensa transpressiva e sem desenvolvimento observável. Por este motivo não se colocou nesta dissertação este tipo de modelo representado pela figura 74 C, uma vez que não tinha qualquer interesse para interpretação.

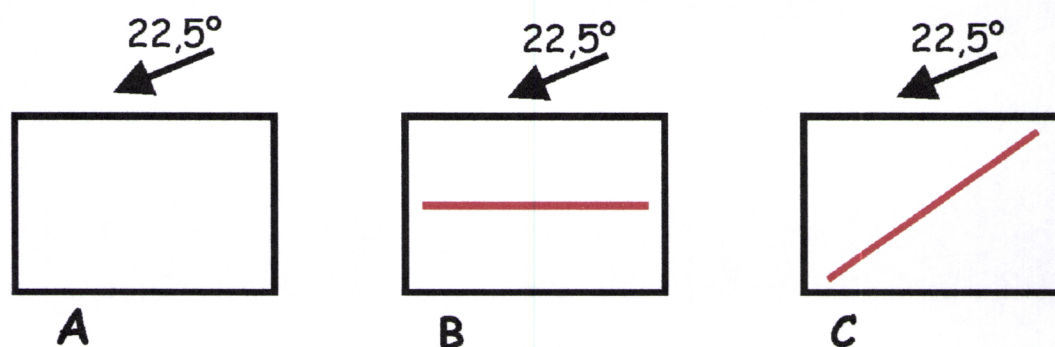


Figura 74 – Modelos dos diferentes tipos de experiências de transpressão com ângulo de convergência de $22,5^\circ$. Anisotropia representada a vermelho.

A – Modelo sem anisotropia.

B – Modelo com anisotropia paralela à parede fixa (parede inferior do modelo).

C – Modelo com anisotropia sub-paralela à direcção de compressão.

II.3.5.2. Experiências sem anisotropia

Foram realizadas várias experiências deste tipo de modelo sem anisotropia com ângulo de convergência de $22,5^\circ$, mas apenas se representa a mais significativa (figura 75). Este modelo é muito próximo do que se tem em Zawiat Moulay Brahim, se considerarmos que a parede fixa corresponde aos cisalhamentos N 130° (ou N 50° W).

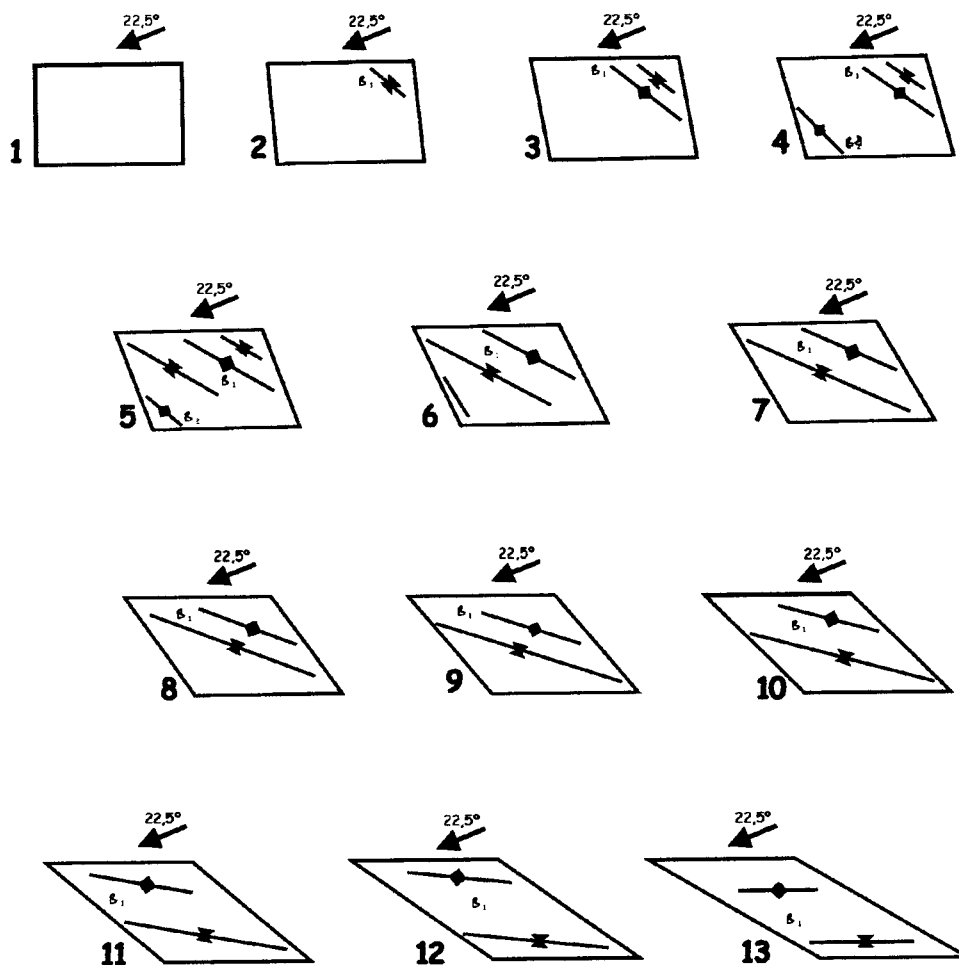


Figura 75 – Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de $22,5^\circ$, sem anisotropia. 1 – Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$. 2 - $\psi = 5^\circ$; $\beta_1 = 40^\circ$. 3 - $\psi = 10^\circ$; $\beta_1 = 38^\circ$. 4 - $\psi = 15^\circ$; $\beta_1 = 35^\circ$; $\beta_2 = 45^\circ$. 5 - $\psi = 20^\circ$; $\beta_1 = 30^\circ$; $\beta_2 = 40^\circ$. 6 - $\psi = 25^\circ$; $\beta_1 = 28^\circ$; β_2 sem significado. 7 - $\psi = 30^\circ$; $\beta_1 = 24^\circ$. 8 - $\psi = 35^\circ$; $\beta_1 = 21^\circ$. 9 - $\psi = 40^\circ$; $\beta_1 = 18^\circ$. 10 - $\psi = 45^\circ$; $\beta_1 = 15^\circ$. 11 - $\psi = 50^\circ$; $\beta_1 = 10^\circ$. 12 - $\psi = 55^\circ$; $\beta_1 = 6^\circ$. 13 - $\psi = 60^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$.

Os dobramentos começam a formar-se aos 5° de cisalhamento angular, têm uma orientação de 40° e, à medida que o cisalhamento angular aumenta a orientação do eixo das dobras decresce até paralelizar (figuras 75, 76 e 77). Isto só acontece com um cisalhamento angular (ψ) de 60°, o que acontece visivelmente mais tarde que em todas as experiências de transpressão a 45° realizadas anteriormente, que paralelizavam aos 30° ou 35°.

Como seria de esperar, os dobramentos têm um comportamento mais próximo de cisalhamento simples, uma vez que se iniciam com ângulos mais próximos dos 45° e como consequência disso paralelizam mais tarde pois necessitam de maior cisalhamento angular para isso acontecer e consequentemente maior tempo de transpressão (figuras 76 e 77).

Âng. Cisal. Angular	Âng. Dobramento β_1	Âng. Dobramento β_2
5	40	
10	38	
15	35	45
20	30	40
25	28	
30	24	
35	21	
40	18	
45	15	
50	10	
55	6	
60	0	

Figura 76 – Tabela dos valores angulares dos dobramentos (β) mediante o aumento progressivo do cisalhamento angular, em transpressão com convergência de 22,5°, sem anisotropia.

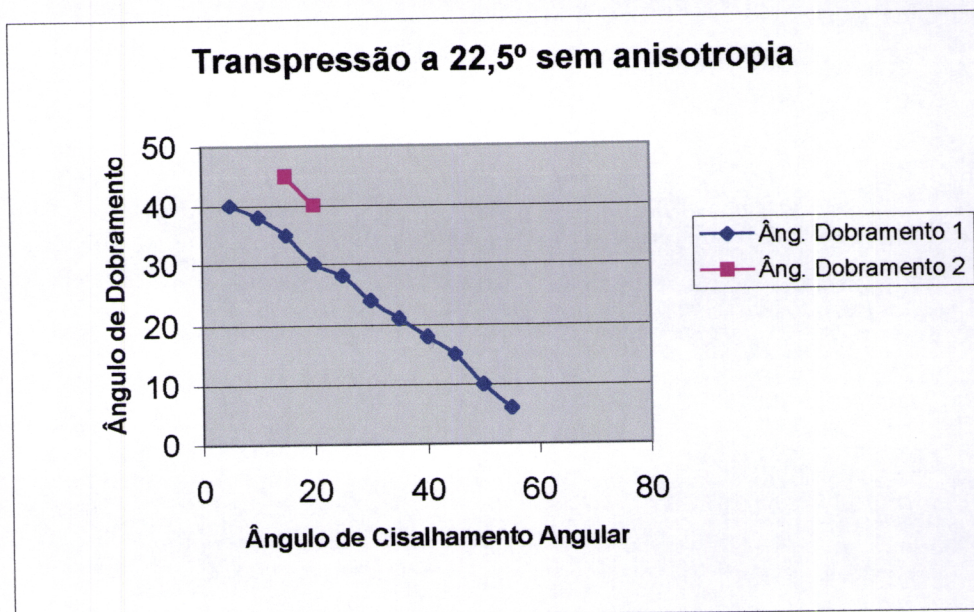


Figura 77 – Gráfico representativo da evolução dos dobramentos em função do cisalhamento angular num sistema transpressivo sem anisotropia, com ângulo de convergência de 22,5°.

Nesta experiência não existe partição da deformação, como tal a transpressão é homogênea, bem como na experiência idêntica (sem anisotropia) com ângulo de convergência de 45° (ponto II.3.4.2).

II.3.5.3. Experiências com anisotropia paralela à parede fixa

Na experiência aqui representada (figura 78) por ser a mais significativa de entre as várias realizadas deste modelo, foi colocado um plano de anisotropia paralelo à parede fixa.

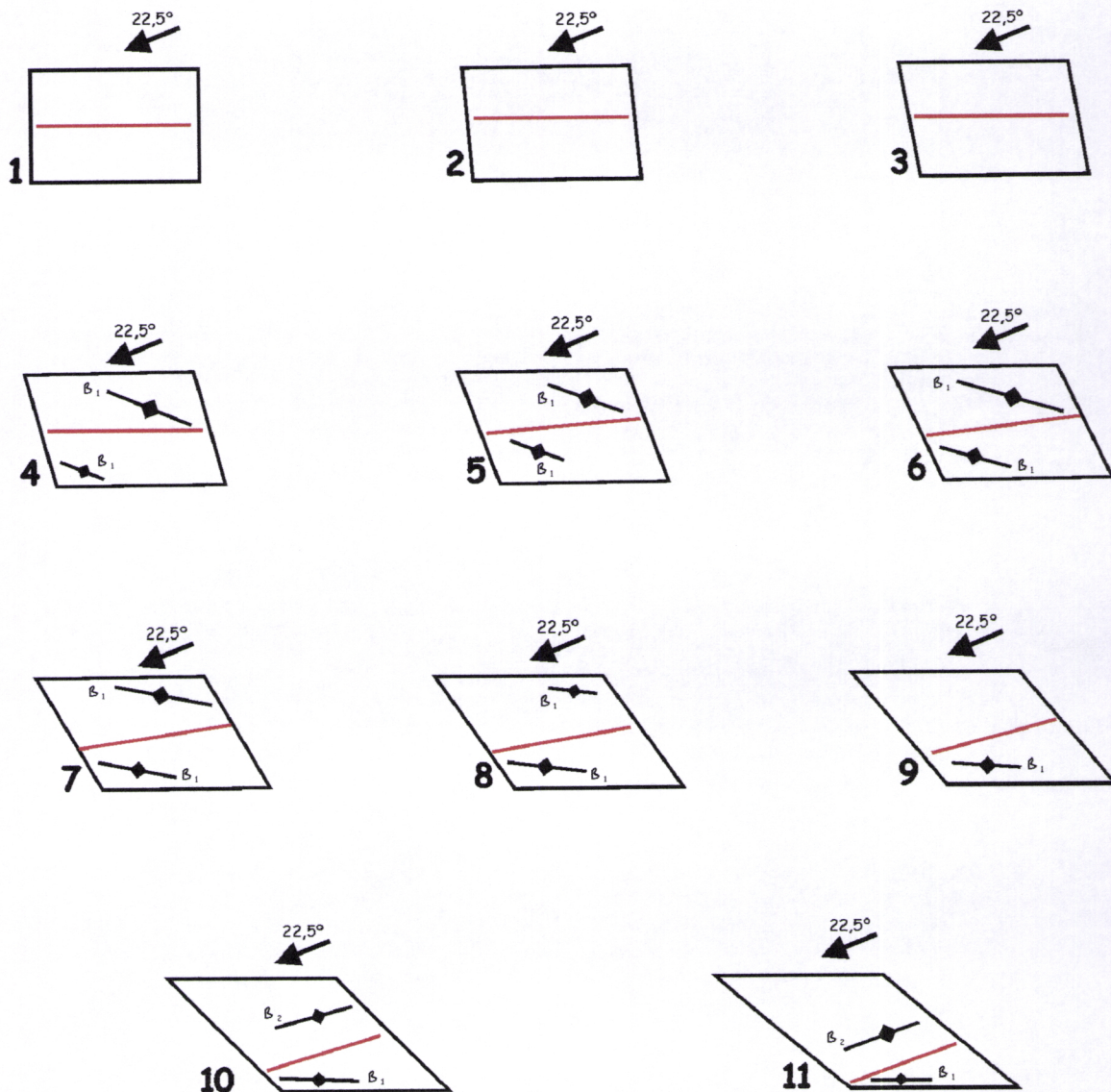


Figura 78 – Ilustrações da evolução do modelo transpressivo com ângulo de convergência de $22,5^\circ$, com anisotropia paralela à parede fixa da prensa. Anisotropia representada a vermelho.

1 - Modelo original antes da deformação transpressiva; $\psi = 0^\circ$. **2** - $\psi = 5^\circ$; sem dobramentos; R_A sem rotação. **3** - $\psi = 10^\circ$; sem dobramentos; R_A sem rotação. **4** - $\psi = 15^\circ$; $\beta_1 = 22^\circ$; R_A sem rotação. **5** - $\psi = 20^\circ$; $\beta_1 = 20^\circ$; $R_A = 5^\circ$. **6** - $\psi = 25^\circ$; $\beta_1 = 16^\circ$; $R_A = 7^\circ$. **7** - $\psi = 30^\circ$; $\beta_1 = 11^\circ$; $R_A = 9^\circ$. **8** - $\psi = 35^\circ$; $\beta_1 = 7^\circ$; $R_A = 10^\circ$. **9** - $\psi = 40^\circ$; $\beta_1 = 4^\circ$; $R_A = 15^\circ$. **10** - $\psi = 45^\circ$; $\beta_1 = 2^\circ$; $\beta_2 = 15^\circ$; $R_A = 17^\circ$. **11** - $\psi = 50^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 20^\circ$; $R_A = 20^\circ$.

Verificou-se que os dobramentos se iniciam mais tarde do que na experiência semelhante mas com ângulo de convergência de 45° (ponto II.3.4.3). Só se desenvolvem dobramentos a partir de ângulos de cisalhamento angular de 15° , formando-se dobras com 22° , que tendem a decrescer com o aumento da rotação da anisotropia e do cisalhamento angular (figura 78). Estes dobramentos também paralelizam mais tarde, por volta dos 50° de cisalhamento angular (figuras 78, 79).

Âng. Cisal. Angular (ψ)	Âng. Dobramento (β)	Rotação Anisotropia
5		
10		
15	22	
20	20	5
25	16	7
30	11	9
35	7	10
40	4	15
45	2	17
50	0	20

Figura 79 – Tabela dos valores de dobramentos (β) e rotação da anisotropia em função do cisalhamento angular (ψ), em sistemas transpressivos com ângulo de convergência de $22,5^\circ$ e anisotropia paralela à parede fixa da prensa.

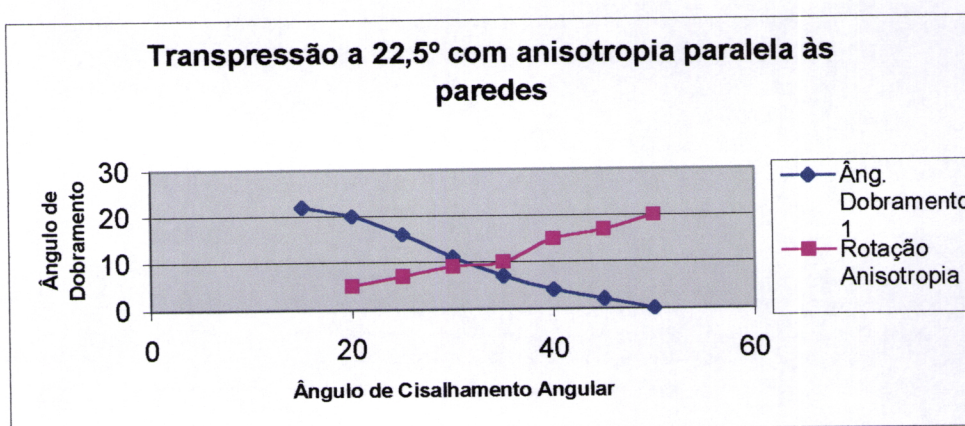


Figura 80 – Gráfico da evolução dos eixos de dobramentos em função do cisalhamento angular; Sistema transpressivo com convergência a $22,5^\circ$ e anisotropia paralela à parede fixa da prensa.

Faz sentido que quando se imprime maior percentagem de cisalhamento simples do que cisalhamento puro ao material (mais transcorrência que compressão), as dobras apareçam e paralelizem mais tardiamente. Devido ao mesmo facto a rotação da anisotropia também se faz sentir mais tardiamente que na transpressão com ângulo de convergência de 45° .

Neste caso de transpressão com $22,5^\circ$ de convergência e anisotropia paralela à parede fixa da prensa, a deformação tem uma progressão homogénea durante a maior parte da experiência (desde os 5° aos 40° de cisalhamento angular – figura 78₁ a 78₉). No entanto com um ângulo de cisalhamento de 45° começam a existir problemas de falta de espaço, havendo ocorrência de dobramentos com orientações distintas a Norte e a Sul da anisotropia, o que mediante o seu desenvolvimento (figura 78₁₀ e 78₁₁) significa haver partição da deformação a partir deste cisalhamento angular.

II.3.6. Síntese Conclusiva

Para sintetizar a análise desta série de experiências laboratoriais podem focar-se dois pontos que parecem ser essenciais:

1. O ângulo com que se começam a formar dobramentos e quando paralelizam em função do ângulo de convergência (α) escolhido.

Alguns dos modelos testados em laboratório foram efectuados para uma transpressão em que a componente de cisalhamento simples é idêntica à componente de cisalhamento puro, sendo o ângulo de compressão ou convergência (α) de 45° . Nestes modelos obtiveram-se resultados que demonstram que numa faixa de cisalhamento gerada em regime transpressivos se formam dobramentos que se iniciam a ângulos menores que 45° (aproximadamente ângulos de 20° em

transpressão homogénea) e tendem a paralelizar à medida que o cisalhamento angular aumenta (normalmente por volta dos 30 a 35°).

Nos modelos transpressivos com ângulo de compressão (α) de 22,5°, ou seja, regime de maior cisalhamento simples, as dobras tendem a formar-se com ângulos mais próximos de 45° e demoram mais tempo (é necessário maior grau de cisalhamento angular – normalmente 55 a 60 °) até paralelizarem.

2. O tipo de transpressão resultante de cada modelo; isto é, se a transpressão foi homogénea, se houve partição da deformação e quais os factores impulsionadores dessa partição.

Em modelos transpressivos sem anisotropias (figuras 60 A e 74 A) a tendência de evolução da deformação é homogénea, independentemente do ângulo de convergência utilizado. Isto resulta em transpressão homogénea.

Em modelos de sistemas transpressivos em que se coloca uma anisotropia paralela à parede fixa da prensa (figura 60 B e 74 B), o desenvolvimento da deformação é distinto a Norte e a Sul da anisotropia, ocorrendo transpressão com partição da deformação. Os dobramentos formados evidenciam a existência de dois blocos de deformação com comportamentos distintos, os quais são separados pela anisotropia que é o factor responsável pela partição da deformação. Em sistemas com ângulos de convergência de 45° essa partição é total e notória desde os primeiros estádios de evolução da experiência (figura 64), mas em sistemas com ângulos de convergência de 22,5° a partição da deformação só se faz sentir parcialmente em estádios finais da experiência (figura 78).

Quando se coloca a anisotropia em posição oblíqua com a parede fixa da prensa vamos ter duas situações.

Na primeira (figuras 60 C e 74 C) em que a anisotropia é colocada sub-paralelamente à direcção de compressão não há partição da deformação. Isto porque a anisotropia colocada nesta posição não serve de barreira ao desenvolvimento da

II.4. Conclusões

A título de conclusão pode dizer-se que as experiências de modelação analógica feitas no Laboratório de Tectónica Experimental e Microtectónica da Universidade de Évora vêm permitir compreender melhor as observações realizadas em Zawiat Moulay Brahim – Marrocos. Isto porque na zona de Zawiat Moulay Brahim temos uma situação de transpressão.

Numa fase inicial de deformação Varisca, D_1 precoce, onde as tensões assumem uma orientação WSW-ENE e a anisotropia (desligamento direito) tem uma atitude N 50 – 70° E (figura 54); o ângulo de convergência (α) representado no campo pela tensão máxima (σ_1) varia entre 20° (para N 70° E) a 40° (para N 50° E).

Numa fase de deformação mais tardia, D_1 tardia, e ainda sob acção de um campo de tensões de orientação WSW-ENE, desenvolvem-se corredores de cisalhamento esquerdos com atitude N 50° W ou N 130° (figura 55) o que implica um ângulo de convergência (α) também representado pela tensão máxima (σ_1) de 50°.

Relacionando os resultados das experiências com os dados de campo, encontram-se algumas diferenças mas também algumas semelhanças nos modelos transpressivos em questão.

Em laboratório a transpressão foi imposta a modelos que têm comportamento dúctil e a deformação (neste caso os dobramentos) foi totalmente induzida pelo ângulo de convergência escolhido.

Em Zawiat Moulay Brahim já existia alguma deformação desde uma fase anterior, D_1 precoce, o que implicaria existência de anisotropias anteriores à fase onde pertencem os corredores de cisalhamento da zona cartografada. E, além disso,

como já foi descrito no ponto II.2.2.3. desta dissertação a zona de Moulay Brahim corresponde a um andar estrutural mais alto, o que significa que a deformação assume um comportamento mais frágil que a induzida nas experiências laboratoriais, onde apesar de tudo a plasticina e silicone utilizados têm um comportamento mais dúctil.

Como conclusões a partir das experiências de modelação analógica tem-se que:

- A existência das anisotropias dentro da zona de cisalhamento tende a fazer as dobras iniciarem-se com um ângulo menor com as anisotropias, o que não é o caso de Zawiat Moulay Brahim.
- Ângulos de convergência altos favorecem que as dobras se iniciem com ângulos menores com as zonas de cisalhamento, o que também não é o caso estudado em Marrocos.
- Convergências de baixo ângulo tendem a fazer rodar as dobras para o paralelismo mais tardiamente, o que se pode aplicar melhor ao caso de Zawiat Moulay Brahim. Deste modo isto parece mostrar que a situação de Moulay Brahim será mais do tipo de cisalhamento simples ou quando muito do tipo *Wrench Dominated Transpression*.

Se compararmos os resultados da experiência de modelação com baixo ângulo de convergência ($22,5^\circ$) sem anisotropia (ponto II.3.5.2; figura 75 – pag. 79) com o modelo obtido em Zawiat Moulay Brahim – Marrocos (figura 55 B – pag. 57), é de chamar a atenção para o facto de na situação de Moulay Brahim não parecer haver rotação nenhuma dos dobramentos em cima das zonas de cisalhamento e portanto mais intensamente deformadas. O que corresponde à situação da experiência com ângulo de convergência de $22,5^\circ$ sem anisotropia, se considerarmos que a parede fixa da prensa corresponde aos cisalhamentos N 130°

(ou N 50° W) e colocarmos o Norte na mesma direcção dos dobramentos formados durante esse modelo (figura 81).

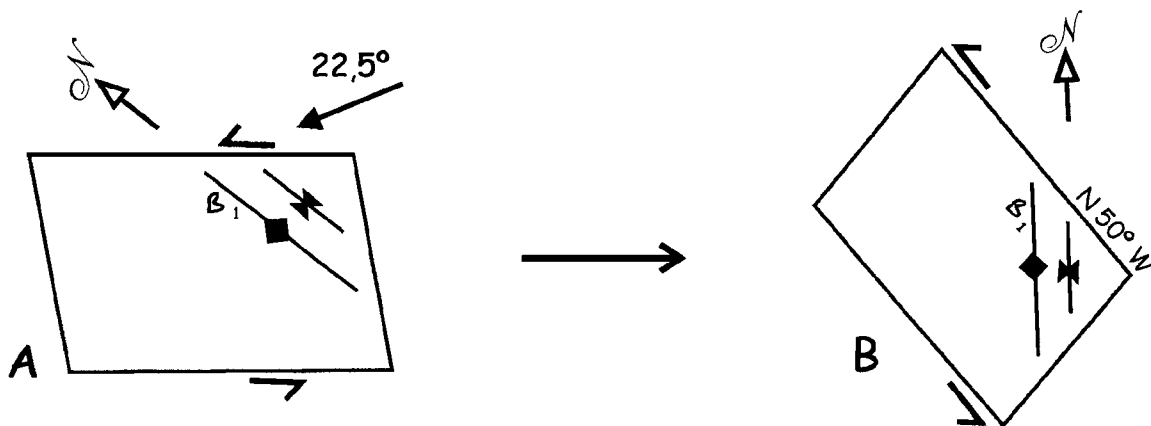


Figura 81 – Esquema ilustrativo da adaptação da experiência sem anisotropia e com ângulo de convergência de 22,5° ao caso de Zawiât Moulay Brahim – Marrocos. **A** – Experiência de modelação analógica com aplicação do referencial Norte no sentido dos dobramentos. **B** – Rotação da experiência anterior para aplicação ao caso de Marrocos, sendo a parede fixa da prensa correspondente aos corredores de cisalhamento N 50° W ou N 130° e os dobramentos de plano axial N-S.

Isto adequa-se a uma deformação mais frágil, típica de um andar estrutural mais alto. O que vem de encontro à experiência, em que os dobramentos têm um comportamento mais próximo de cisalhamento simples, já que o ângulo de convergência é de 22,5° (maior componente de cisalhamento simples e menor componente de cisalhamento puro) e, uma vez que estes se iniciam com ângulos mais próximos dos 45° e como consequência disso paralelizam mais tarde ou não chegam a paralelizar, pois necessitam de maior cisalhamento angular para isso acontecer e consequentemente maior tempo de transpressão.

Assim podem interpretar-se os afloramentos estudados na zona de Zawiât Moulay Brahim – Marrocos como sendo o resultado de um jogo de corredores de cisalhamentos N 130° esquerdos sujeitos a tensões WSW-ENE, que devido ao seu regime de transpressão com baixo ângulo de convergência (com maior componente

de transcorrência do que componente compressiva), intensificaram a deformação nas zonas cisalhadas. Isto traduziu-se por dobramentos de menor amplitude mas de planos axiais que se mantiveram N-S e eixos moderadamente mergulhantes para Norte como comprovam as experiências de modelação analógica adaptadas ao terreno (figura 81).

III. PARTIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM REGIMES TRANSPRESSIVOS INDUZIDA POR ANISOTROPIAS

III. PARTIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM REGIMES TRANSPRESSIVOS INDUZIDA POR ANISOTROPIAS

III.1. Introdução Teórica

A transpressão e a transtensão são deformações do tipo desligamento que divergem do cisalhamento simples devido a uma componente de encurtamento ou extensão ortogonal na zona de deformação. Ocorrem numa larga variedade de escalas durante fases de deformação na litosfera terrestre; em maior escala são uma consequência inevitável do movimento relativo das placas irregulares numa superfície esférica.

Estes tipos de deformação transpressiva (TP) ou transtensiva (TT) podem ocorrer tanto em zonas orogénicas colisionais como em margens de subducção oblíquas (TP), arcos insulares (TP e TT), bandas de contracção (TP) e distensão (TT), zonas continentais de rift (TT) especialmente durante os estádios iniciais de separação dos continentes e de formação de litosfera oceânica, ou durante extensões orogénicas tardias (TT) onde a deformação é acompanhada de grandes perdas de volume.

Estes são apenas alguns dos factores básicos das zonas de deformação transpressiva ou transtensiva que permitem um olhar ainda pouco profundo para a enorme importância que elas têm na Geologia.

Padrões de Deformação

Os estudos existentes que padronizaram, por assim dizer, o tipo de deformações, foram feitos através de modelos numéricos transpressivos e transtensivos utilizando tensões finitas e progressivas.

O modelo de Sanderson & Marchini, 1984 (figura 82 a) envolve volume constante e tensão homogênea aplicada numa zona vertical na qual o encurtamento horizontal (ou extensão) na zona vai ser compensado pela extensão vertical (ou encurtamento). É possível alterar este modelo fazendo variar as condições limitantes por forma a permitir: mudanças de volume (figura 82 b; Fossen & Tikoff, 1993), estiramento lateral (figura 82 c; Dias & Ribeiro, 1994 ; Jones et al. 1997), ou uma componente de cisalhamento simples e oblíquo na qual os blocos fronteiros são dispostos vertical ou lateralmente (figura 82 d; Robin & Cruden, 1994; Jones & Holdsworth, 1998).

Todos estes modelos foram idealizados comparativamente com os padrões de tensão que ocorrem naturalmente em zonas de cisalhamento.

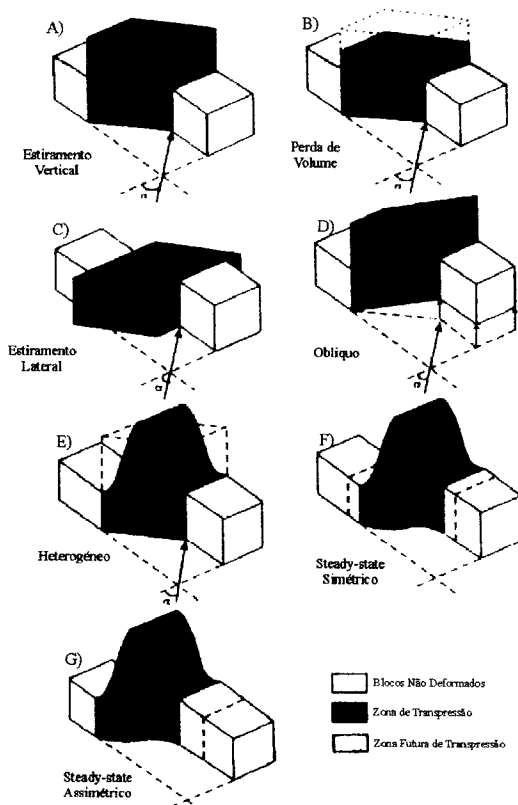


Figura 82 – Exemplos de Modelos de Transpressivos, In: Holdsworth, R. E. , Strachan, R. A. & Dewey, J. F. (1998).

Um modelo mais realista vai mostrar um gradiente de tensão desenvolvido a partir de desligamento zero nas paredes limites até à extensão vertical máxima no centro da zona, obtendo-se uma tensão heterogénea (figura 82 e; Robin & Cruden, 1994).

No entanto estes modelos são extremamente complexos e não permitem generalizações em relação a forças finitas. Em todos os modelos abordados anteriormente a zona de deformação tinha uma largura fixa, pelo que a taxa de tensão iria aumentar exponencialmente (transpressão) ou decrescer também exponencialmente (transtensão).

Nos três primeiros modelos analógicos mais simples (figuras 82 a, b, c), um dos eixos principais da tensão finita permanece fixo e vertical à medida que a deformação aumenta, enquanto que os outros dois eixos rodam no plano horizontal devido à componente de cisalhamento simples não-coaxial. Isto produz uma tensão que associada ao cisalhamento simples tem uma simetria monoclinica. Por outro lado os modelos mais complexos (figuras 82 d, e) requerem uma componente oblíqua de cisalhamento simples que geralmente tem uma simetria triclinica na qual os três eixos de tensão finita rodam relativamente a uma referência fixa externa.

Se se representarem num gráfico os resultados obtidos do ângulo de convergência versus taxa de tensão, em quase todas as zonas de transpressão ou transtensão, o movimento das placas, os eixos de tensão instantânea e os eixos de tensão finita são oblíquos (figura 83). Contudo o movimento horizontal das placas corresponderá apenas a uma das três apófises (figura 83) que definem a taxa máxima ($k = \infty$), intermédia ($k = 1$) e mínima ($k = 0$) do movimento das partículas na zona de deformação. Estas apófises ($k = \infty$, $k = 1$, $k = 0$) controlam a rotação passiva das estruturas na zona de deformação, mesmo quando estas estruturas foram formadas inicialmente como resposta a tensões instantâneas ou finitas. Isto vem demonstrar que as relações entre os movimentos tectónicos e os padrões de tensão são complexos.

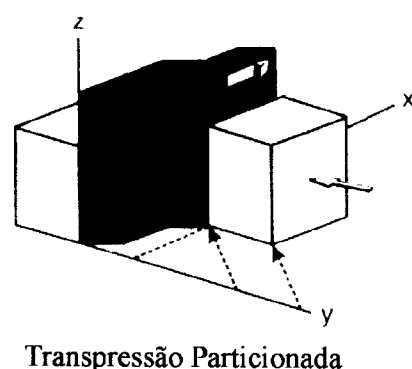
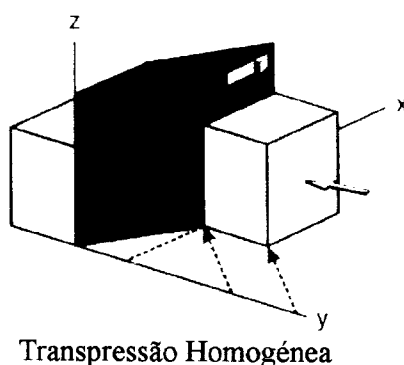


Figura 84 – Transpressão não particionada ou homogênea e Transpressão Particionada, na qual existe uma significativa componente de distensão acomodada por uma falha de desligamento discreta; In: Holdsworth, R. E. , Strachan, R. A. & Dewey, J. F. (1998).

A partição da tensão também pode ser facilitada pela reactivação de fraquezas estruturais pré-existentes que estejam orientadas satisfatoriamente para minimizar o trabalho feito (Jones & Tanner, 1995), ou em ângulos cujo coeficiente de fricção de deslizamento é menor que o coeficiente de fricção interna para as novas falhas. Isto pode ser particularmente observado na partição bimodal simples dos arcos insulares onde uma zona de grande fraqueza ao longo de um eixo magmático representa uma superfície satisfatória para acomodar a componente de desligamento.

Platt (1993) demonstrou, modelando uma grande variedade de reologias de prismas acreccionários, que um modelo linear viscoso gera continuamente partição da deformação perto da Zona Benioff com um aumento rápido da componente de desligamento. Contudo, um modelo reologicamente

plástico demonstrou uma forte dependência do ângulo de convergência; com ângulos de convergência grandes há muito pequena ou mesmo nenhuma partição; com ângulos pequenos de convergência gera-se uma forte partição da deformação em componentes inversas e de desligamento. Este modelo é bem ilustrado pelo baixo grau de partição nas ilhas a Sul na Nova Zelândia e pelo alto grau de partição da zona de Santo André, onde a obliquidade é respectivamente alta e baixa (Teyssier et al. 1995). Tikoff & Teyssier (1994) sugeriram que a partição da deformação parece gostar especialmente de baixos ângulos de convergência ou divergência ($< 20^\circ$) devido ao não paralelismo do aumento dos eixos de tensão finita.

Padrão de Fabric e Estilo Estrutural

O ângulo de obliquidade, a intensidade da tensão finita e o grau da partição cinemática controlam a orientação do fabric tanto na transpressão como na transtensão. Em zonas de transpressão monoclinica onde a grande deformação segue o modelo de Sanderson & Marchini (1984) com estiramento vertical, os deslizamentos nas principais superfícies aplanadas (clivagem, xistosidade, gneissicidade) variam com a componente não-coaxial da tensão (figura 85 A a F), mas o mergulho é sempre vertical.

Caracteristicamente segundo Sanderson & Marchini (1984) as lineações com estiramento associado podem mudar de verticais a horizontais, onde o ângulo de convergência $< 20^\circ$. Se não ocorrer partição cinemática, o estiramento das lineações será inicialmente horizontal, mas à medida que a tensão finita aumenta passará a vertical. Se, todavia, a componente distensiva não-coaxial for cinematicamente particionada em limites paralelos à zona de grande tensão as lineações verticais podem inverter para orientações sub-horizontais.

Os exemplos de campo deste comportamento foram descritos por Hudleston et al. (1988), Holdsworth (1989) e Tikoff & Greene (1997).

Contrariamente, em transtensão, a direcção de estiramento é sempre horizontal, mas a direcção de encurtamento muda de vertical para horizontal

quando o ângulo de convergência $<20^\circ$ com o aumento da tensão finita (McCoss, 1986). Então, se não ocorrer nenhuma partição cinemática, qualquer fabric sofre alterações de vertical para horizontal com o aumento da tensão ou vice-versa quando os limites paralelos dominados por cisalhamento simples e zonas de grande tensão se formam como resultado da partição. Este comportamento de mudanças é suprimido em zonas de Transpressão e Transtensão onde existe uma componente de estiramento lateral significativa (figura 82 c) e as lineações são maioritariamente horizontais (Jones et al, 1997).

A relação entre os fabrics planares e lineares em zonas de transpressão e transtensão triclinica (figuras 82 d, 82 e) é pouco conhecida. Os modelos preliminares de Robin & Cruden (1994) sugerem que as variações sistemáticas e complexas na orientação tanto da foliação como da lineação ocorrerão dependendo da intensidade da tensão finita, da obliquidade da componente de cisalhamento simples e da natureza da partição cinemática na zona de deformação. Isto parece conseguir alguma consistência nas observações de campo feitas em zonas de transpressão onde existem evidências de uma componente de cisalhamento simples vertical (Holdsworth, 1994).

Exemplos de zonas de transpressão médio-crustais mostram configurações similares excepto nos blocos que podem ser internamente deformados e as estruturas de blocos limites são agora zonas de cisalhamento dúctil (Hudleston et al. 1988; D'Lemos et al. 1992). A natureza das estruturas transpressivas e transtensivas na crosta inferior pouco dúctil e no manto superior muito dúctil não é certa, mas tem alguma importância se acoplada ao modelo proposto por Molnar (1992) para zonas de convergência e divergência oblíqua sendo este correcto.

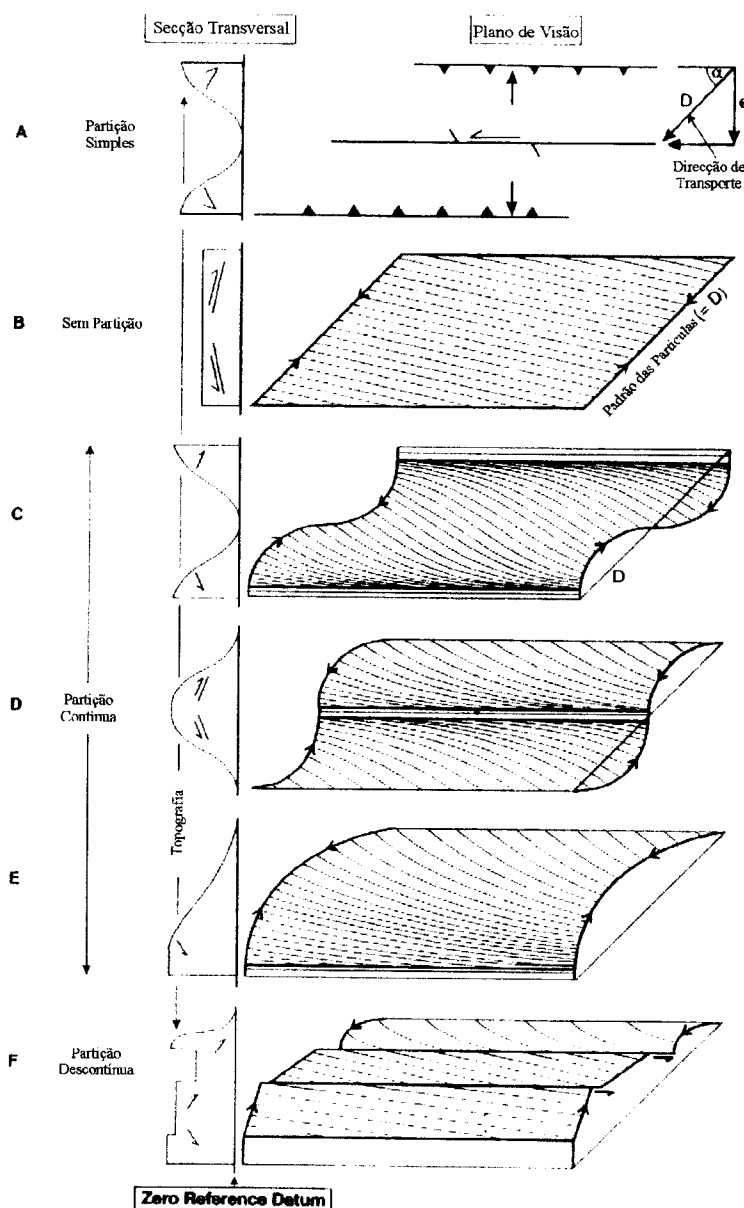


Figura 85 – O plano de visão da superfície de 6 zonas de transpressão mostra vários graus e estilos de partição, padrões de partículas nas zonas transpressivas (indicados pelas setas dos lados) e traços de clivagem (representados pelas linhas finas), In: Holdsworth, R. E. , Strachan, R. A. & Dewey, J. F. (1998). **D** é a direcção de transporte tectónico; α é o ângulo entre D e a zona marginal; e é a direcção da zona normal. Os perfis topográficos e os movimentos inversos ou gravitacionais são indicados na secção transversal e assinalados com meias setas.

A – Partição simples com cinturas cavalgantes marginais e uma zona de desligamento central. **B** – Zona sem partição de clivagem obliqua (o padrão de partículas é paralelo ao D). **C** – Partição contínua simétrica de componentes coaxiais e não-coaxiais em direcção aos vértices e ao centro da zona, respectivamente. **D** – Partição contínua simétrica de componentes coaxiais e não-coaxiais em direcção ao centro e aos vértices da zona, respectivamente. **E** – Partição contínua assimétrica de componentes coaxiais e não-coaxiais para os dois lados da zona. **F** – Partição descontínua dos componentes coaxiais e não-coaxiais.

Transpressão, Topografia e Exumação

Os mergulhos em larga escala ou as zonas verticais de transpressão desenvolvem por vezes superfícies topográficas significativas nas terminações laterais das zonas de deformação como por baixo das mesmas zonas. Estas topografias podem ser suficientes para gerar episódios regionais importantes de deformação por gravidade que poderá ajudar a exumação das rochas crustais profundas. Variações na intensidade da tensão, partição cinemática e a orientação dos limites das zonas de deformação vão ser afectados pela superfície topográfica das zonas de transpressão e irão resultar em geometrias e distribuição da deformação pela gravidade.

Implicações

Todas as zonas de transpressão e transtensão tendem a mostrar tensões não coaxiais e tridimensionais.

Os padrões de tensão deduzidas em zonas de transpressão e transtensão têm algumas implicações importantes para a comunidade geológica:

1 – *Técnicas de cortes transversais*; muitos dos estudos quantitativos da deformação crustal usam secções transversais à estrutura geológica e assumem explícita ou implicitamente tensões bidimensionais.

2 – *Elipsóide de tensão e fracturação*. Wilcox et al (1973) e Harding (1974) usaram uma elipse bidimensional de tensão finita para quantificar as estruturas de desligamento formadas em modelos análogos a zonas de deformação de desligamentos observadas num plano. Estes trabalhos demonstram que modelos assim podem ser usados qualitativamente para explicar padrões de deformação em zonas de desligamento onde o plano de cisalhamento esteja bem definido e a deformação se aproxime de um cisalhamento simples. Contudo, estes elipsóides também são muito usados na interpretação de padrões de fracturação em bacias sedimentares *offshore* e nalguns casos são usados como suporte para hipóteses de desligamento ou de abertura oblíqua (Gibbs, 1986; Fossen, 1989; Doré & Lundin, 1996). A utilização destes modelos de cisalhamento simples bidimensionais em regiões de tensões transtensivas

tridimensionais é inapropriada e pode originar sérios erros na interpretação dos padrões de deformação crustal.

3 – Complexidade estrutural. Os padrões de deformação complexos e pouco conhecidos são semelhantes a zonas de transpressão e transtensão. Os estudos de campo existentes mostram que as estruturas que diferem significativamente em orientação podem formar-se simultaneamente. Muitos destes factores eram e por vezes ainda são interpretados como produtos de eventos de deformação polifásicos. Existe uma dificuldade mais fundamental nas zonas de transpressão porque não há uma relação simples entre as lineações de estiramento e a direcção de transporte tectónico. Podem ocorrer mudanças marcantes nos padrões de lineação devido a variações espaciais da tensão finita e/ou da partição cinemática (Tikoff & Greene, 1997). Este problema é particularmente acutilante em zonas de transpressão triclínica, onde a relação precisa entre o desenvolvimento das estruturas geológicas e a deformação é pobremente compreendido.

4 – Dedução dos movimentos das placas. As zonas de transpressão e de transtensão apresentam problemas particulares quando se tenta relacionar os padrões de deformação crustal e os movimentos relativos das placas. Se ocorrer partição cinemática a deformação visível numa região não é representativa do sistema como um todo. Isto é particularmente importante no reconhecimento de movimentos de deslizamento paralelos em zonas de deformação crustal porque as estruturas gravam esses movimentos que ocorrem normalmente em zonas estreitas de tensões muito elevadas e extensões limitadas que podem ser pouco expostas (Goodwin & Williams, 1996).

5 – Condições limitantes versus Stress. A análise de zonas de transpressão e transtensão tem revelado a importância das condições limitantes durante a deformação da crosta e da litosfera (Molnar, 1992; Tikoff & Teyssier, 1994). Muitas das aproximações tradicionais em zonas de deformação seguem Anderson (1951) pois consideram a tensão como o principal factor controlador da deformação, particularmente na crosta dúctil.



III.2. Deformação Proterózoica no Orógeno Brasileiro Setentrional – Brasil

III.2.1. Enquadramento Geodinâmico

A área que foi objecto de estudo neste capítulo foi afectada pela designada Deformação Proterózoica da Orogenia Brasileira Setentrional, como tal é necessário enquadrá-la na sua situação geográfica e também, em termos geodinâmicos para que melhor se possa compreender qual a sua relação com o tema desta dissertação de mestrado.

No contexto geológico o Brasil (figura 86) é dividido para além do Quadrilátero Ferrífero, por 7 zonas correspondentes às Orogenias Brasileiras e por 4 Cratões ou Escudos (Alkmim, 2001).

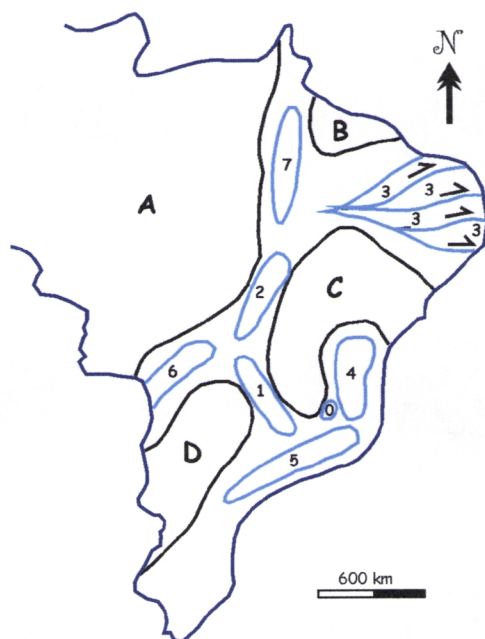


Figura 86 – Mapa ilustrativo da divisão do Brasil no contexto geológico. *Cratões* : **A** – Cratão Amazônia. **B** – Cratão de São Luís. **C** – Cratão de São Francisco. **D** – Cratão Rio de La Plata. **0** – Quadrilátero Ferrífero. *Orogenias* : **1** – Brasiliana Meridional. **2** – Brasiliana Setentrional. **3** – Província de Borborema. **4** – Araçuaí – Congo Ocidental. **5** – Ribeira e Dom Feliciano. **6** – Paraguai. **7** – Araguaia.

As sete zonas das Orogenias Brasileanas são designadas: Brasileira Meridional, Brasileira Setentrional, Província de Borborema, Araçuaí – Congo Ocidental, Ribeira e Dom Feliciano, Paraguai e Araguaia (figura 86).

Os Cratões existentes são o Cratão Amazônia, o Cratão de São Francisco, o Cratão Rio de La Plata e o Cratão de São Luís (figura 86); definidos como domínios crustais e que não se encontram profundamente deformados ou metamorfizados desde o Mesoproterozoico.

Os cratões têm soco Arcaico com idade superior a 2,7 G.a. e Paleoproterozoico compreendido entre 2,1 e 1,9 G.a.; e estão envolvidos por Cadeias Orogénicas Neoproterozoicas: o chamado Brasileiro (equivalente ao Pan Africano) com idade compreendida entre os 650 e os 500 M.a.

Estes quatro cratões terão estado anteriormente unidos no supercontinente Rodínia (cerca dos 1.000 M.a.). As colisões Brasileanas (entre Brasil e África) levaram à sua nova união constituindo-se em Gondwana Ocidental.

Para a evolução de todo este sector Alkmin et al (2001), propõem o seguinte modelo. Por volta dos 750 M.a. existiam 4 grandes blocos (figura 87-A): o bloco constituído pelo Cratão Amazônia e pelo West Africano, o bloco do Cratão de Borborema, o bloco do Cratão de Rio de La Plata e o bloco constituído pelo Cratão de São Francisco e pelo Congo (que estão ligados antes da abertura do Atlântico Sul, formando deste modo um só cratão conjunto). Aos 730 M.a. a disposição seria semelhante, à excepção dos blocos mais a sul uma vez que se iniciou a Orogenia Brasileira Meridional ocorrendo a colisão do Cratão de Rio de La Plata com o Cratão São Francisco – Congo (figura 87-B). Cerca dos 630 M.a. teriam ocorrido novas colisões e os 3 blocos estariam unidos (figura 87-C). Mais tarde, aproximadamente por volta dos 550 M.a. o Cratão de Rio de La Plata – Ribeira e o Cratão de Borborema sofreriam extrusão lateral (figura 87-D) afastando-se dos restantes.

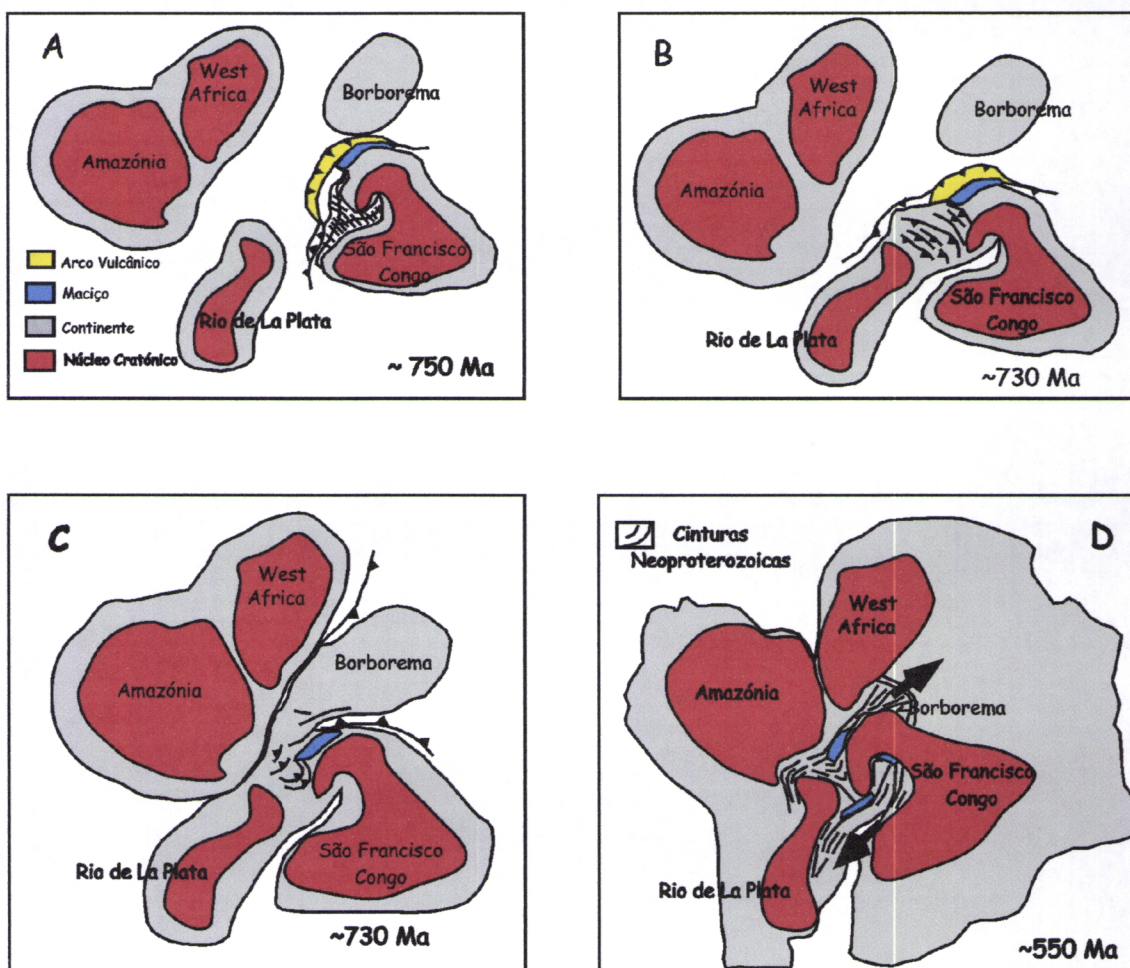


Figura 87 – Modelo de evolução dos 4 cratões até à formação da Gondwana Ocidental. **A** – Os cratões principais e a sua posição aos 750 M.a. O maciço representado a azul corresponde ao maciço Central de Goiás. **B** – O estágio inicial da deriva; colisão entre o cratão Rio de La Plata e o cratão de São Francisco/Congo, por volta dos 730 M.a. **C** – Um estágio intermédio da deriva; Colisão dos restantes cratões, aos 630 M.a. **D** – O estágio final da deriva que resultou na formação da Gondwana Ocidental, cerca dos 550 M.a.; a Província de Borborema e a cadeia de Ribeira (cratão de Rio de La Plata) sofrem extrusão lateral.

III.2.2. Compartimentação Tectónica

A Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967), edificada no bordo Oeste do Cratão de São Francisco (figura 88), estende-se por mais de 1.000 km na direcção norte-sul, através dos Estados de Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Tocantins.

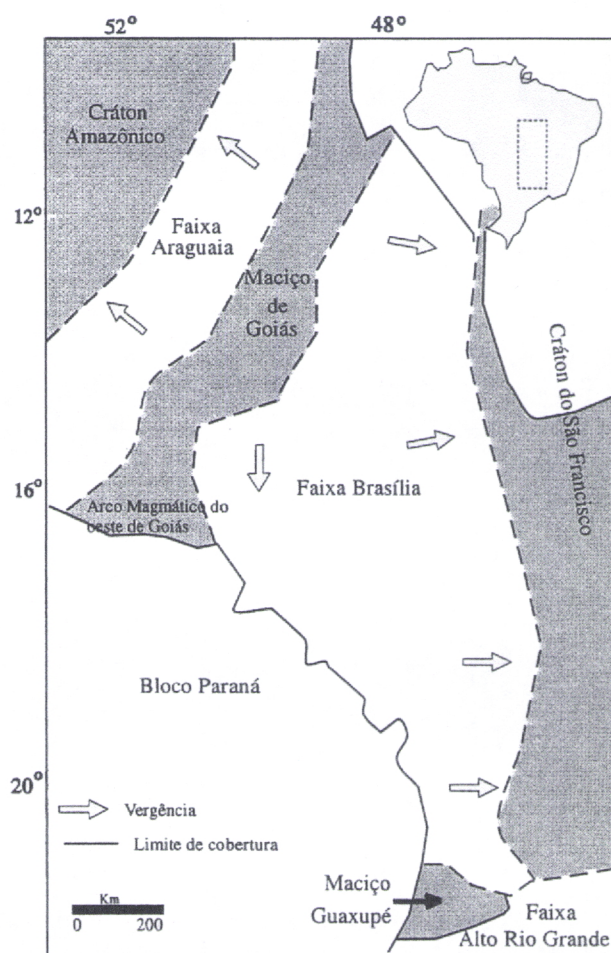


Figura 88 – Esboço geotectônico do Brasil central. Modificado a partir de Schobbenhaus Filho (1993) e Fuck (1994).

Esta faixa exhibe diversos compartimentos tectônicos, caracterizados pela diversidade de material envolvido, grau de metamorfismo e estilo estrutural, apresentando diversos grupos e formações geológicas (figura 89).

Recentemente, Fuck (1994) distinguiu na Faixa Brasília os seguintes compartimentos:

- Zona Cratônica; representada por algumas exposições do soco e por coberturas fanerozóicas e precâmblicas, cuja deformação, quando existente, é de caracter pelicular.
- Zona Externa; que compreende várias unidades metasedimentares de vários grupos existentes na região (grupos Paranoá, Bambuí, Canastra e Ibiá – figura 89), e da Formação Vazante, todos estruturados numa cintura de dobras e falhas de antepaís.