

## Referência Bibliográfica

ADACHI, J.I, *et. al.* **Determination of rock strength parameters from cutting tests. Rock Mechanics Tools and Techniques.** 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Balkema, Rotterdam. 1996.

ALMENARA, R.; DETOURNAY E. **Cutting experiments in sandstones with blunt PDC cutters.** In Proc. EuRock 1992, p. 215-220.

APPL, F.C.; ROWLEY, D.S. **Analysis of the Cutting Action of a Single Diamond.** Society of Petroleum Engineers Journal, 8 , p. 269-280. 1968.

ATKINS, A.G. **Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems.** Int. J. Mech. Sci., Volume 45, p. 373-396. 2003

BAR-COHEN, Y. (Ed.); ZACNY K. (Ed.) **Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and Other Planets,** Wiley-VCH, 2009

CHEATHAM J.J.B.; DANIELS, W. **A study of factors influencing the drillability of shales: single cutter experiments with stratapax drill blanks.** J. Energy Resour. TechnoL. 1979.

COUDYZER C.; RICHARD T. **Influence of the Back and Side Rake Angles in Rock Cutting.** AADE-05-NTCE- 75 - Proceedings of National Technical Conference and Exhibition. 2005

DETOURNAY E.; ATKINSON C. **Influence of pore pressure on the drilling response of PDC bits.** 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Oklahoma. 1991.

DETOURNAY E.; DEFOURNY P. **A Phenomenological Model of the Drilling Action of Drag Bits.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. e Geomech., Abstr. Vol.29, No.1. 1992

DETOURNAY E.; TAN C. P. **Dependence of drilling specific energy on bottom-hole pressure in shales.** SPE-78221, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Texas. 2002.

EVANS I. **A theory of the basic mechanics of coal ploughing.** Proc of int. symp. Min. res., London, Vol. 2. Oxford: Pergamon Press, p. 761-98. 1962.

GARCIA-GAVITO, D.: **Cutting Mechanics Modeling for Polycrystalline Diamond Compacts and Extension to the Drill Bit.** PhD Thesis, University of Tulsa, Oklahoma, 1998.

GERBAUD, L., MENAND, S.; SELLAMI, H. **PDC Bits: All Comes From the Cutter/Rock Interaction.** SPE-98988, IADC/SPE Drilling Conference, Florida, USA. 2006.

GLOWKA D.A. **Use of Single Cutter Data in the Analysis of PDC Bit Designs: Part 1 – Development of a PDC cutting Force Model.** SPE Journal of Petroleum Technology, 41, p.797- 849.1979.

GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**, Wiley, 2a Edição. 1989.

GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications**, Elsevier, 2008.

JIANYONG,P. **Interpretation of Single Cutter Tests For Rock Mechanical Properties.** 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois.2012.

KURU E.; WOJTANOWICZ A. K. **An experimental study of sliding friction between PDC drill cutters and rocks.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 32, No.3, p. 277–283. 1995.

MARTINEZ, I. M. R.: **Modelagem Numérica do Processo de Corte em Rocha para Perfuração de Poços de Petróleo**, Dissertação de mestrado, PUC-Rio, 2012.

MERCHANT E. **Mechanics of metal cutting process I. Orthogonal cutting and a type 2 chip.** Journal of Applied Physics, Vol.16, No.5, p.267-275. 1945.

MERCHANT E. **Mechanics of metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting.** Journal of Applied Physics, Vol.16, No.6, p.318-324. 1945.

MITCHELL, R.F. (Ed.) AND MISKA S.Z. (Ed.). **Fundamentals of Drilling Engineering**, Society of Petroleum Engineers, 1a Ed.. 2011

MITCHELL, R. F.(Ed.). **Petroleum Engineering Handbook: Volume II - Drilling Engineering**, Society of Petroleum Engineers, 2a Ed. 2017

NISHIMATSU, Y. **The mechanics of rock cutting.** Int. Jor. Rock Mech. Min. Sci. Vol.9, No.2, p.61–70.1972.

PINTO, C. N.: **Uso de Elementos Discretos na Modelagem Numérica da Perfuração de Poços de Petróleo por Brocas PDC.** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2011.

RAHMANI, R., SMITH, J.R., TALEGHANI, A.D. **Analytical Modeling of PDC Single Cutter-Rock Interaction Under Confining Pressure.** 46th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois. 2012.

RAJABOV V. *et. al.* **The Effects of Back Rake and Side Rake Angles on Mechanical Specific Energy of Single PDC Cutters with Selected Rocks at Varying Depth of Cuts and Confining Pressures.** SPE-151406, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, California, USA. 2012.

RAFATIAN N. *et. al.* **Experimental study of MSE of a single PDC cutter interacting with rock under simulated pressurized conditions.** SPE Drilling e Completion Journal, Volume 25, Number 1, Pages 10-18. 2010.

RICHARD, T., COUDYZER,C.; DESMETTE,S. **Influence of groove geometry and cutter inclination in rock cutting.** ARMA 10-429. 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City. 2010.

RICHARD T., *et. al.* **Rock strength determination from scratch tests.** Engineering Geology, Vol. 147–148, p. 91–100. 2012.

RICHARD, T., *et. al.* **The Scratch Test As A Means To Measure Strength of Sedimentary Rocks.** SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim, Norway. 1998.

SHAMOTO,E; ALTINTAS, Y.. **Prediction of shear angle in oblique cutting with maximum shear stress and minimum energy principles.** Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 121, No. 3, p.399-407.1999.

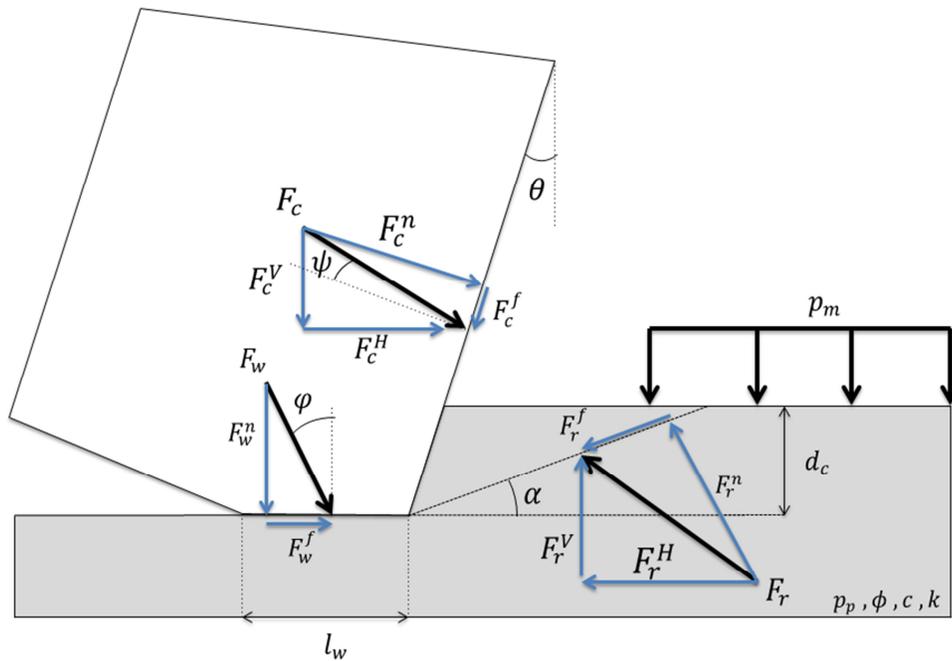
SCHEI G., *et. al.* **The Scratch Test: An Attractive Technique for Determining Strength and Elastic Properties of Sedimentary Rocks.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas.2000.

WHITTAKER, B.N., SINGH, R.N.; SUN, G. **Rock fracture mechanics: principles, design and applications,** 2a Ed., Elsevier, 1992.

ZIJLING, D. H. **Single Cutter testing - A key for PDC bit development,** SPE-16529, Offshore Europe, Aberdeen, United Kingdom. 1987.

## Apêndice A

Esta seção apresenta o desenvolvimento das equações para a obtenção das Eq.(2.17) e Eq.(2.22) para corte em rocha. Para tal, utilizar-se-á a Figura A.1 como referência.



**Figura A.1: Esquema de forças 2D no corte ortogonal em rocha.**

Para cortador afiado:

$$F_w^f = F_w^n = F_w = 0 \quad (\text{A.1})$$

As forças atuantes no cortador podem ser decompostas em forças normais à face do cortador e forças de fricção:

$$F_c^n = F_c^H \cdot \cos \theta + F_c^V \cdot \sin \theta \quad (\text{A.2})$$

$$F_c^f = F_c^V \cdot \cos \theta - F_c^H \cdot \sin \theta \quad (\text{A.3})$$

Ou, reescrevendo as Eq.(A.2) e Eq.(A.3):

$$F_c^H = F_c^n \cos \theta - F_c^f \sin \theta \quad (\text{A.4})$$

$$F_c^V = F_c^n \sin \theta + F_c^f \cos \theta \quad (\text{A.5})$$

Na rocha, a força resultante no plano de falha da rocha pode ser calculada por:

$$F_r^s = F_c^n \cos(\theta + \alpha) - F_c^f \sin(\theta + \alpha) \quad (\text{A.6})$$

$$F_r^n = F_r^s \cdot \tan((\psi + \theta) + \alpha) \quad (\text{A.7})$$

As tensões atuantes no plano de falha da rocha são:

$$\tau_r^s = \frac{F_r^s}{A_r^s} = \frac{F_r^s}{\frac{A_0}{\sin \alpha}} \quad (\text{A.8})$$

$$\sigma_r^n = \frac{F_r^n}{A_r^s} = \frac{F_r^n}{\frac{F_r^s}{\tau_r^s}} = \tau_r^s \frac{F_r^n}{F_r^s} = \tau_r^s \tan((\psi + \theta) + \alpha) \quad (\text{A.9})$$

Com base na força total de corte,  $F_c$ , pode-se relacionar a força de corte,  $F_c^H$ , com a força de cisalhamento na rocha,  $F_r^s$ , através de:

$$F_c^H = F_r^s \frac{\cos(\theta + \psi)}{\cos(\theta + \psi + \alpha)} \quad (\text{A.10})$$

Utilizando-se da Eq.(A.8), pode-se reescrever a Eq.(A.10), de onde se obtêm:

$$F_c^H = \tau_r^s A_0 \frac{\cos(\theta + \psi)}{\sin \alpha \cos(\theta + \psi + \alpha)} \quad (\text{A.11})$$

Assumindo que a falha da rocha seja bem representada pelo critério de Mohr-Coulomb, pode-se substituir a tensão de cisalhamento da rocha por:

$$\tau_r^s = \tau_0 + k(\sigma_r^n + p_b - p_p) \quad (\text{A.12})$$

Porém,  $\tau_r^s$  e  $\sigma_r^n$  estão relacionadas por:

$$\sigma_r^n = \tau_r^s \cdot \tan(\theta + \psi + \alpha) \quad (\text{A.13})$$

Substituindo  $\sigma_r^n$  em  $\tau_r^s$  e resolvendo para  $\tau_r^s$ , obtêm-se:

$$\tau_r^s = \frac{\tau_0 + k(p_b - p_p)}{1 - k \cdot \tan(\theta + \psi + \alpha)} \quad (\text{A.14})$$

Substituindo  $\tau_r^s$  em  $F_c^H$ , chega-se a:

$$F_c^H = \frac{\cos(\theta + \psi) A_h [\tau_0 + k(p_b - p_p)]}{\sin \alpha [\cos(\theta + \psi + \alpha) - k \cdot \sin(\theta + \psi + \alpha)]} \quad (\text{A.15})$$

Tomando-se como referência o extremo inferior do cortador, onde este entra em contato com a rocha, pode-se utilizar a segunda lei da termodinâmica, sabendo-se que, no seu plano de atuação, a rocha intacta não tem variação de entropia (energia interna constante). Desse modo:

$$\delta U = \delta E - \delta W = 0; \quad (\text{A.16})$$

Como apresentado por Merchant, pelo princípio da mínima energia, o ângulo  $\alpha$  será definido pelo ângulo que minimiza o trabalho realizado pela força horizontal. Assim,

$$\frac{\partial F_c^H}{\partial \alpha} = 0 \quad (\text{A.17})$$

Diferenciando-se  $F_c^H$  em  $\alpha$  e igualando a zero, pode-se obter o valor de  $k$ , que é:

$$k = \cot(2\alpha + \psi + \theta) \quad (\text{A.18})$$

Assim, pode-se afirmar que:

$$\cot(2\alpha + \psi + \theta) = \tan \varphi \quad (\text{A.19})$$

Desta forma, podem-se relacionar os ângulos de fricção interno da rocha  $\varphi$  com o ângulo de cisalhamento  $\alpha$  por:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{(\varphi + \psi + \theta)}{2} \quad (\text{A.20})$$

Voltando-se a equação da energia de corte, pode-se calcular a energia específica por:

$$\epsilon = \frac{W}{V} = \frac{\int F_c^H dx}{\int A_h dx} = \frac{F_c^H}{A_h} \quad (\text{A.21})$$

$$\epsilon = \frac{2 \cos \varphi \cos(\psi + \theta)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} [\tau_0 + (p_b - p_p) \tan \varphi] \quad (\text{A.22})$$

A Eq.(A.22) define o corte para um cortador afiado. Caso o cortador seja desgastado:

$$F_w^f = F_w^n \tan \psi_w \quad (\text{A.23})$$

As forças totais atuantes no cortador podem ser decompostas, então, como:

$$\sum F^H = F_c^H + F_w^f \quad (\text{A.24})$$

$$\sum F^V = F_c^V + F_w^n \quad (\text{A.25})$$

Na rocha, a força resultante no plano de falha da rocha pode ser calculada por:

$$F_r^s = (F_c^H + F_w^f) \cdot \cos \alpha - F_c^V \cdot \sin \alpha \quad (\text{A.26})$$

$$F_r^n = F_r^s \cdot \tan((\psi + \theta) + \alpha) \quad (\text{A.27})$$

Escrevendo-se  $F_w^n$  em função de  $\sum F^V$  e sabendo-se que  $F_w^f = F_w^n \tan \psi_w$ , pode-se reescrever a equação de  $\sum F^H$ , obtendo-se, assim:

$$\sum F^H = F_c^H + \left( \sum F^V - F_c^V \right) \tan \psi_w \quad (\text{A.28})$$

Como  $F_c^V = F_c^H \tan(\theta + \psi) = F_c \sin(\theta + \psi)$ , pode-se escrever, então:

$$\sum F^H = F_c^H + \left( \sum F^V - F_c^H \tan(\theta + \psi) \right) \tan \psi_w \quad (\text{A.29})$$

Que reorganizando, chega a:

$$\sum F^H = F_c^H (1 - \tan(\theta + \psi) \tan \psi_w) + \sum F^V \tan \psi_w \quad (\text{A.30})$$

Substituindo  $F_c^H = \epsilon \cdot A_T$ , e dividindo-se tudo pela área de corte,  $A_T$ , tem-se:

$$E = (1 - \tan(\theta + \psi) \tan \psi_w) \epsilon + S \tan \psi_w \quad (\text{A.31})$$

## Apêndice B

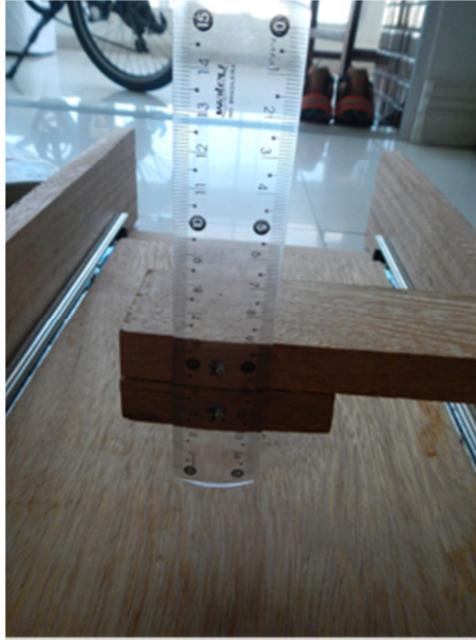
Neste apêndice, será apresentada a máquina construída, bem como o experimento realizado para se verificar a direção do ângulo de falha lateral da rocha.

A ‘máquina de teste’ pode ser visualizada na Figura B.1. A máquina consiste em dois suportes guia de madeira conectados por duas chapas de compensado para dar estabilidade. Uma chapa de madeira é então acoplada aos suportes guia através de uma corredeira telescópica. Desta forma, a chapa de madeira se comporta como a base de uma gaveta, que pode correr tanto para frente como para trás. Nessa chapa, será colocado o material que será cortado. Para evitar que o material a ser cortado se desloque para frente no momento de corte, um pedaço menor de madeira é afixado na frente da chapa de madeira.

O cortador, feito com uma régua, é pregado a um suporte de cortador (Figura B.2), e este é fixado por um pino em um dos suportes guias. A régua, que representa o cortador, possui *backrake* zero. Como apenas se está interessado em saber o ângulo lateral de falha, não há a necessidade de variar o *backrake*.



**Figura B.1: ‘Máquina experimental de corte’ montada para validar a solução do ângulo lateral de falha obtido.**



**Figura B.2:** Foto da régua que representa o cortador acoplada ao suporte de cortador.

A orientação do cortador pode ser alterada apenas através da rotação do suporte de cortador com relação ao suporte guia. Para evitar que o cortador mude de orientação durante o corte, furos foram realizados no suporte guia. Com esses furos, pinos de segurança podem ser colocados de acordo com o *siderake* desejado, impedindo que a rotação do suporte de cortador ocorra. Isso pode ser visto na Figura B.3.

Nesta figura, podem-se ver os pinos de segurança orientando o suporte de cortador a zero *siderake*. Por motivos operacionais, uma vez que a máquina de corte foi feita de forma simples, apenas pode-se orientar o cortador a *siderakes* de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$ . Os furos para o pino de segurança foram realizados através do cálculo do comprimento da hipotenusa de um triângulo retângulo com base na espessura do suporte guia para diferentes ângulos de *siderake*.

A Figura B.4 mostra como foi realizado o experimento. Uma argila, material dúctil semelhante ao corte plástico de rochas, conforme apresentado por Cheatham e Daniels (1979), é colocada no suporte base. Esse suporte, que está todo para frente, é então empurrado contra o cortador.



**Figura B.3: Pinos de segurança para evitar a rotação do suporte de cortador e furos que determinam a direção do *siderake*.**



**Figura B.4: Demonstração do teste de cortador a ser realizado em argila.**

A Figura B.5 mostra o cortador no início do corte. Pode-se perceber que, na superfície da argila, estrias começam a ser formadas até que o chip apareça. Foi assumido, então, que essas estrias representam as bandas de cisalhamento do material.

Assim, para diferentes etapas de corte, as estrias formadas na superfície da argila foram então destacadas através de uma caneta marcadora, e a direção base dessas estrias foi marcada através de uma linha pontilhada.



**Figura B.5: Formação do chip e estrias na superfície da argila no início do corte para um cortador com 30° *siderake*.**

Para o corte com *siderake* de 30°, pode-se perceber que a direção base das estrias tende a ser perpendicular a face do cortador, como pode ser visto nas Figura B.6 à Figura B.9. Na Figura B.10, pode-se ver a cunha formada pelo corte por trás do cortador. Pode-se perceber que a parede da esquerda é mais vertical que a parede da direita, o que se assemelha ao corte apresentado na Figura 3.7.

A mesma tendência de falha pode ser percebida para o corte a 60° *siderake* (Figura B.11 e Figura B.12). Nestas figuras, pode-se perceber que o aparecimento das estrias na superfície da argila sugere que a mesma ocorre perpendicularmente à face do cortador.



**Figura B.6: Direção da falha da rocha no meio do corte para um cortador com 30° *siderake*.**



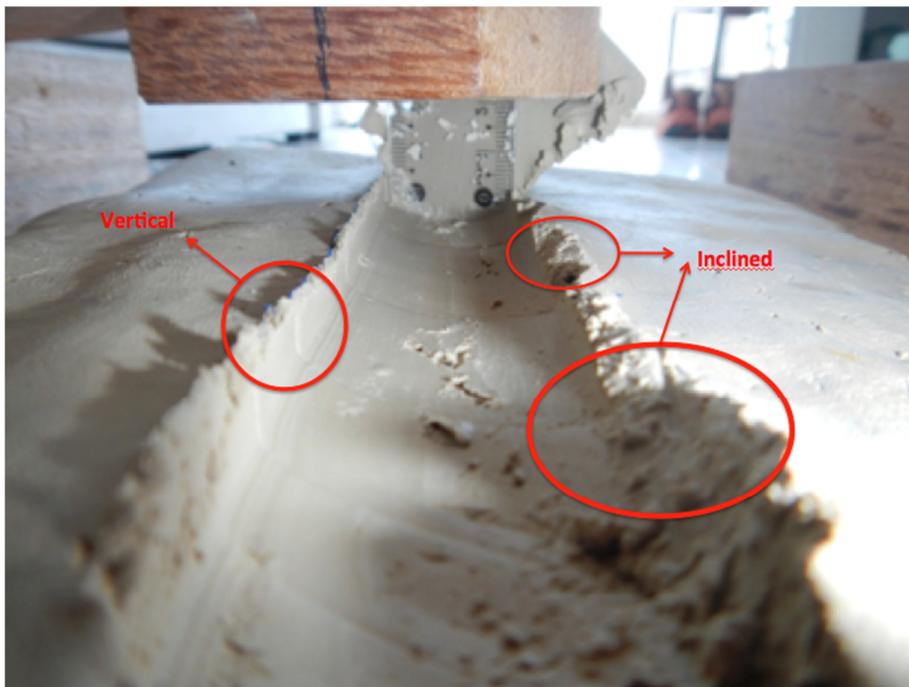
**Figura B.7:** Direção da falha da rocha no início do corte e sua direção com relação à direção do movimento para um cortador com 30° *siderake*.



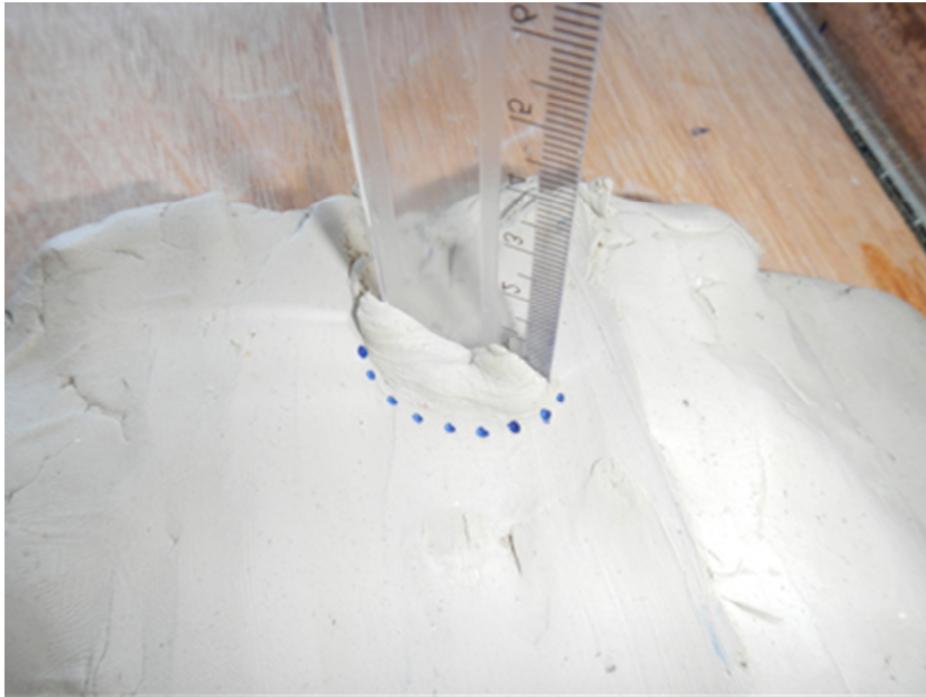
**Figura B.8:** Vista superior da falha da rocha no meio do corte e sua direção para um cortador com 30° *siderake*.



**Figura B.9:** Final do corte e direção da falha da argila para um cortador com  $30^\circ$  siderake.



**Figura B.10:** Vista de trás do corte demonstrando a cunha formada pelo cortador com  $30^\circ$  siderake.



**Figura B.11: Início do corte para um cortador com  $60^\circ$  siderake e orientação da falha da argila.**



**Figura B.12: Início do corte para um cortador com  $60^\circ$  siderake e orientação da falha da argila em relação a direção de movimento.**