

Avaliação de Transferência de Carga em Tirantes ancorados com Resinas de Poliéster

Alexandre Assunção Gontijo
MecRoc Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, alexandre.gontijo@mecroc.com.br

Arthur Resende Matos
MecRoc Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, arthur.matos@mecroc.com.br

Julio Lopez
ProdiMin, Lima, Peru, jclopez1051@gmail.com

Gustavo A. Pereira Batista
AngloGold Ashanti, Crixás, Brasil, gabatista@anglogoldashanti.com.br

Luiz Cláudio G. Couto
Couto Geotecnia, Vazante/MG, Brasil, luiz.c.couto@hotmail.com

Rafael Maurin Grittin
Nexa Resources, Vazante, Brasil, rafael.gritti@nexaresources.com

João Paulo Silva de Freitas
Caraiba Metais, Pilar/BA, Brasil, joao.paulo@minacaraiba.com

RESUMO: Existe uma variação significativa da resistência de aderência no comprimento de ancoragem, ou seja, na interface tirante / resina / rocha, que depende das características geométricas do tirante, qualidade operacional de instalação, características do maciço rochoso e do elemento de ligação. Essas diversas variáveis definem a performance do sistema de reforço e seus riscos. Neste estudo será apresentado uma análise em detalhe das metodologias SEPT e *Grip Factor* no maciço rochoso de uma mina subterrânea de ouro, em três diferentes designs de barra, buscando comparar e avaliar qual tem a melhor performance no desempenho do sistema de reforço em campo. Será avaliado a qualidade de mistura da base de resina e catalisador, o fenômeno de confinamento propiciado pelo design / rosca do tirante e sentido de rotação no momento da instalação, além da resistência à aderência, onde será possível entender a real transferência de carga do conjunto. Sugestões para a melhoria do sistema de reforço serão incluídas.

PALAVRAS-CHAVE: Tirante, Cartucho de Resina, Transferência de Carga, *Grip Factor*, Aderência, Teste de arrancamento.

1 INTRODUÇÃO

Nas minerações subterrâneas brasileiras o uso de reforço químico, utilizando barras de aço e cartuchos de resina de poliéster, iniciou-se entre as décadas de 80 e 90, e desde então, vem se

tornando recomendações operacionais padrão em áreas de desenvolvimento, devido a proporcionar uma maior segurança na escavação, ou seja, possibilita o uso de torque no sistema, o que garante um confinamento dos médios e grandes blocos na zona plastificada

dos arredores da abertura.

Os esforços em um sistema de ancoragem são derivados do deslocamento do maciço rochoso (MR), sendo que os tirantes podem sofrer carregamentos longitudinais, por tração, ou cortantes, por cisalhamento. Os sistemas de atirantamento podem falhar dependendo de onde os movimentos internos estão concentrados, sendo no colar do furo, exercendo esforços não dimensionados na parte externa do conjunto (chapa/porca), como ilustra a Figura 2(a), ou no fundo/topo do furo, conforme ilustra a Figura 2(b). Nesse segundo caso, se a carga submetida ao sistema de ancoragem excede à resistência de aderência, em um comprimento de ancoragem conhecido e inferior ao necessário, acarreta o deslizamento do tirante (perda de aderência).

Existe uma variação significativa da resistência de aderência no comprimento de ancoragem, ou seja, na interface tirante / resina / rocha, que depende das características geométricas do tirante, qualidade operacional de instalação, características do maciço e do elemento de ligação. Essas diversas variáveis definem a performance do sistema de reforço e seus riscos. Os riscos podem ser reduzidos quando implementado e incorporado ao sistema de qualidade indicadores padrão, como o *Grip Factor* (GF), e procedimentos padrão como ensaios de tração utilizando metodologia SEPT (*short encapsulation pull test*) em conjunto com auditoria regular de qualidade dos materiais utilizados, assim como, o procedimento de instalação, sendo mecanizado, ou manual, o que garante o desempenho esperado do tirante ancorado de modo a reduzir riscos de acidente por deslocamento de rocha.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 Mecanismo de falhas em sistemas de atirantamento com coluna total

Segundo Fabjanczyk e Tarrant (1992), os esforços em um sistema de ancoragem são derivados da movimentação/deslocamento do maciço rochoso, ou seja, em casos de

mecanismos de ruptura gravitacional, conforme ilustra a Figura 1, os tirantes podem sofrer carregamentos longitudinais (tração) ou cortantes (cisalhamento).

De acordo com Signer, S. (2000) os sistemas de atirantamento podem falhar, dependendo de onde os movimentos internos no MR estão concentrados, sendo no colar do furo, exercendo esforços não dimensionados na parte externa do conjunto (chapa/porca), como ilustra a Figura 2(a), ou no fundo/topo do furo, conforme ilustra a Figura 2(b). Nesse segundo caso, se a carga submetida ao sistema de ancoragem excede à resistência de aderência, em um comprimento de ancoragem conhecido e inferior ao necessário, acarreta o deslizamento do tirante (perda de aderência).

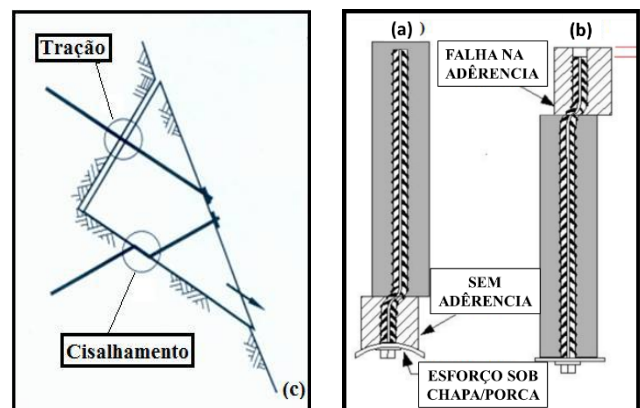


Figura 1. Mecanismos de ruptura do MR
Figura 2(a). falha externa e (b). falha no fundo do furo

2.2 Influência do perfil do tirante

A resistência do tirante é transferida para o MR através da resina de poliéster. Toda aderência do sistema está nas irregularidades internas do furo e nas nervuras da barra. De acordo com Aziz, N. e Jalalifar, H. (2005), ensaios de laboratório comprovam que a falha da aderência ocorre em corte, ou seja, um cisalhamento interno no elemento de ligação (resina) em contato com a barra conforme ilustra a Figura 3. Segundo Kilic, A. et. al. (2002), tal resistência de aderência, ou *Grip Factor*, varia de acordo com o design da barra, dependente da altura, espessura, bem como o espaçamento dos filetes / ressaltos da rosca.

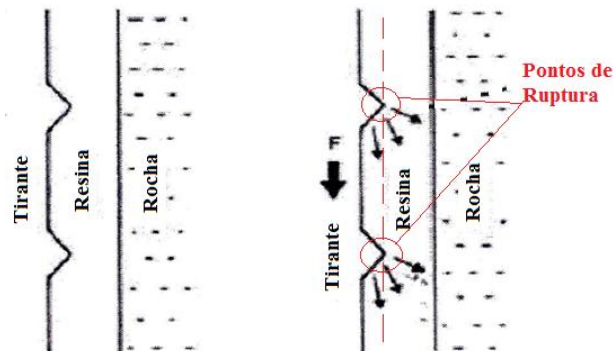


Figura 3. Detalhe dos pontos de ruptura no contato tirante - resina

Além do fenômeno de transferência de carga, o perfil da barra influencia na qualidade operacional da instalação de tirante / resina:

- Poder de confinamento da resina ao final do furo ou expulsão da mesma do furo, dependendo do sentido da rotação no momento da instalação do tirante.
- Qualidade da mistura e homogeneização da base de poliéster com o catalisador, além da garantia da trituração da membrana que reveste o cartucho.

2.3 Parâmetros críticos para a operação de atirantamento com cartuchos de resina

O sistema de reforço tem sido amplamente utilizado tanto em MR compactos quanto em MR fraturados, para compensar a força de tração e aumentar a resistência ao cisalhamento nas discontinuidades. O reforço de rocha consiste na introdução de um elemento estrutural (aço) no interior do MR para auxiliar seu auto suporte, através de uma ação confinante e melhoria de sua condição mecânica (tração e corte).

Por essa razão, um sistema de reforço ou ancoragem funcionará como um esforço direto de tração, além de estar exposto a um esforço de corte, conforme indicado na figura 4 a seguir.

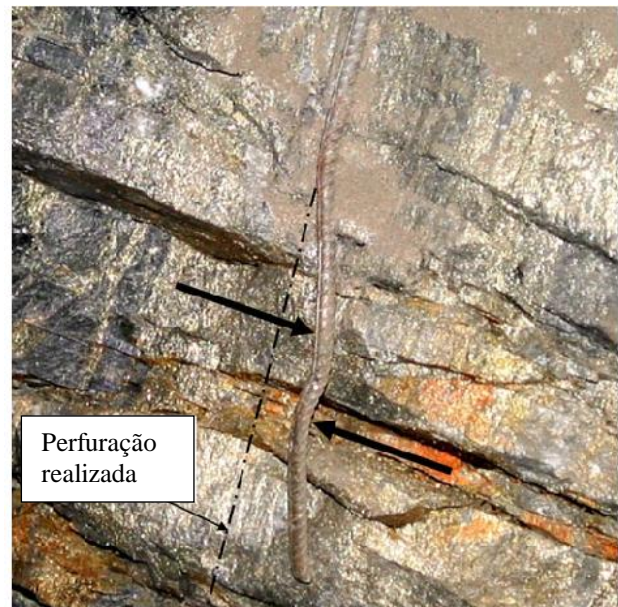


Figura 4. Detalhe do comportamento do tirante em um esforço cisalhante.

Segundo Gontijo, A. et. al. (2016), para entender o desempenho de um tirante, a análise do comportamento deve estar associada à avaliação de pelo menos três parâmetros principais e, claro, vários modos de transferência de carga entre esses elementos coexistirão.

Os parâmetros a serem considerados determinarão a eficiência do sistema de reforço, podendo esses ser variáveis controláveis e não controláveis no processo operacional da atividade. Sobre as variáveis não controláveis, a geologia é a maior incógnita por não ser conhecida em detalhes em uma mina. Dentro das variáveis controláveis os parâmetros a considerar são: Perfuração, Resinamento e Atirantamento. A Tabela 1 mostra esses parâmetros e o nível de criticidade de cada uma das variáveis para a operação do sistema de reforço.

Tabela 1. Nível de criticidade das variáveis controláveis e não controláveis da atividade de atirantamento.

Parâmetros	Variáveis Controladas	Criticidade	
		baixo	alto
Perfuração	Diâmetro		x
	Comprimento		x
	Roto-percussão	x	
	Rotação pura	x	
	Desvio	x	
	Malha		x
	Inclinação		x
Resinamento	Qualidade cartuchos		x
	Distribuição cartuchos		x
	Quantidade cartuchos		x
	Diâmetro cartuchos		x
	Comprimento cartuchos		x
	Temperatura e umidade		x
Atirantamento	Rotação (rpm)		x
	Tempo de mistura		x
	Sentido da mistura		x
	Torqueamento		x
	Design do tirante		x
	Comprimento do tirante		x
	Diâmetro do tirante		x
Variáveis Não Controladas	Geologia		x
	Infra-estrutura		x

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo foi executado em uma mina subterrânea de ouro no Brasil, onde se realizou 09 (nove) perfurações na litologia Xisto. Todas as perfurações foram pré-determinadas em comprimentos de 1,9m, na lateral da escavação, no MR de qualidade razoável¹ (RQD entre 50 a 75), buscando ancorar o tirante apenas nos últimos 30cm do fundo da perfuração, ou seja, em uma zona *in situ*. A Figura 5 ilustra os locais do teste, a litologia e a qualidade geomecânica.

¹ Todo mapeamento foi realizado pela equipe geomecânica da Mina.

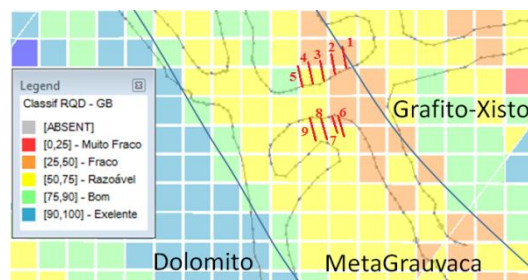


Figura 5. Local das perfurações e instalações de tirantes (testes) realizados na MSG.

Todos os furos foram executados horizontais, paralelos à foliação, considerando ser a pior condição. A quantidade de testes executados foi definida de acordo com os guias: I. Canbulat et. al. (2006) e Health and Safety Executive (1996), sendo 03 (três) por perfil de tirantes.

3.1 Tipos de tirantes

Todos os testes executados foram realizados utilizando o mesmo diâmetro de perfuração de 35mm e diâmetro de tirante = 7/8” ou 22mm (diâmetro nominal). Variando o design de rosca, conforme ilustra a Figura 6 (a, b, c).

Os testes foram executados buscando abranger todos os diferentes perfis de barra, para se ter um comparativo entre resistência de aderência (GF) em comprimentos de ancoragens similares.

Tirante Rosca Helicoidal - Hel. (Thread Bar)

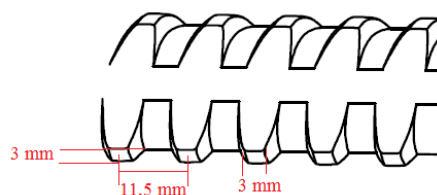


Figura 6(a). Detalhe do perfil da barra HEL

Tirante Rosca Redondo “Integral” – R.I. (All Thread Bar)

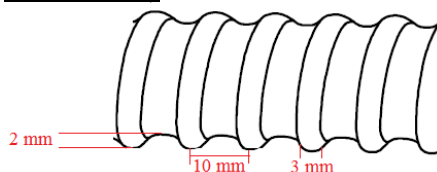


Figura 6(b). Detalhe do perfil da barra R.I

**Tirante Rosca Redondo “Modificado” – R.M.
 (All Thread “Modified” Bar)**

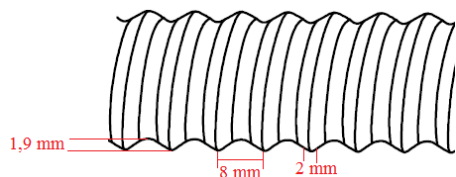


Figura 6(c): Detalhe do perfil da barra R.M.

3.2 Cartuchos de resina de poliéster

Para os testes, utilizaram-se cartuchos de resina de poliéster do fabricante Rock Support (Figura 7), de diâmetro = 28 mm e comprimento 315 mm, com início de tempo de gel² de 60 segundos e tempo de cura final de 120 segundos.

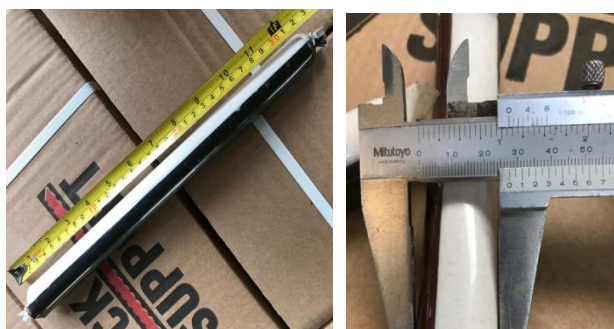


Figura 7. Dimensões do Cartucho de resina utilizado.

A Tabela 2 apresenta resultados de laboratório referente à resistência mecânica³ à compressão uniaxial das resinas de poliéster, onde se conclui que, até 24h depois de homogeneizado da base com catalisador, tem-se uma resistência superior a 93% da resistência final.

Tabela 2. Resistência mecânica das resinas de Poliéster X Tempo de cura. (fonte: Laboratorio LabCon)

² Denomina-se tempo de gel o tempo que a resina necessita para iniciar uma reação de um estado viscoso para uma cristalização, considerando uma homogeneização adequada entre a base de poliéster com catalisador, sendo nesse caso: mínimo de 40 rotações do tirante.

³ A resistência mecânica da resina de poliéster varia de acordo com os agregados e a base de poliéster que compõe os cartuchos.

Id. Corpo de prova	Idade	c' (kPa)	Data		Fck (Mpa)
			Ruptura	Carga (KN)	
Teste 1	6hs	04/02/2016	04/02/2016	46,6	24,75
	12hs	10:00 hs	04/02/2016	51,6	26,13

O comprimento do cartucho foi determinado pela Formula (1), seguindo metodologia SEPT, garantindo que não se produza um comprimento de ancoragem superior à 300mm (1ft), no fundo da perfuração.

$$SEPT = \frac{(Df)^2 - (Dt)^2}{(Dc)^2} \times 300mm = 314mm \quad (1)$$

Df – Diâmetro da perfuração

Dt – Diâmetro da barra do tirante

Dc – Diâmetro do cartucho de resina

Segundo Craig, P. et al (2014), a aderência entre resina/tirante e resina/rocha é um parâmetro crítico do sistema de reforço, e como em alguns países não existe uma recomendação de órgãos fiscalizadores sobre o tema, a metodologia SEPT tem se tornado a melhor forma de controle de aderência em ancoragens químicas, principalmente, nas minas de carvão.

De acordo com Karabin e Debevec (1976), testes utilizando SEPT devem ser realizados de tempos em tempos, em diferentes litologias, como controle de qualidade das resinas de poliéster utilizadas.

4 RESULTADOS

Todos os tirantes foram instalados utilizando Jumbo Atlas Copco (modelo: Boomer 281), com sentido de rotação buscando o confinamento da resina ao fundo do furo, com aproximadamente 180 RPM.

De acordo com Mark, C. et al (2002), a eficiência da aderência (GF) é definida como a resistência de ancoragem do tirante por polegada (inch). O GF é calculado pela carga máxima aplicada no conjunto de força (Fórmula 2), em até 24 horas após instalação, utilizando um comprimento de ancoragem pré-definido

(SEPT) até a ruptura na interface rocha / resina / tirante, conforme ilustra o esquema do teste na Figura 8.

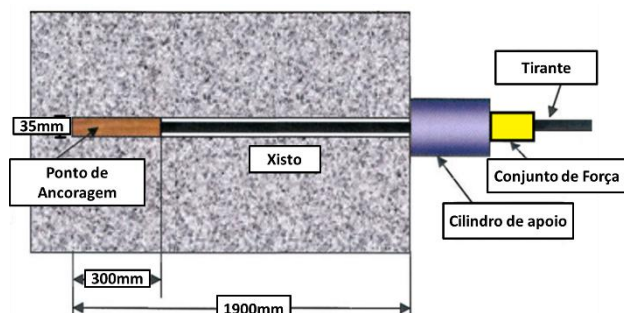


Figura 8. Desenho esquemático dos testes realizados

$$\text{Grip Factor} = \frac{\text{Carga máx. SEPT (tons)}}{30 \text{ cm (ou 12 inch)}} \quad (2)$$

A Tabela 3 apresenta as informações dos resultados campo⁴ e análises posteriores:

Tabela 3. Resultado dos testes

Testes	Tirantes	T.I. (seg)	P.T. (Ton)	G.F. (Ton/cm)	F.A.
1	HEL.	25	12.5	0.42	R/T
4	HEL.	25	11.3	0.38	R/T
7	HEL.	30	18.9	0.63	R/T
2	R.I.	25	13.2	0.44	R/T
5	R.I.	25	15.7	0.52	R/T
8	R.I.	30	9.4	0.31	R/R
3	R.M.	25	14.4	0.48	R/R
6	R.M.	25	8.1	0.27	R/R
9	R.M.	30	13.2	0.44	R/R

T.I.: Tempo de instalação (mistura) / **P.T.:** Pull Test / **G.F.:** Grip Factor / **F.A.:** Falha de Adêrência (R/T: resina/tirante e R/R: resina/rocha)

A figura 9 apresenta os valores médios do GF de acordo com o *design* da barra utilizado nos testes. O tirante de rosca helicoidal (HEL.) e de rosca redondo integral (R.I.) apresentaram uma média de 0,48 Ton/cm, enquanto que o tirante de rosca redondo “modificado” (R.M.) teve uma média de GF inferior, 0,46 Ton/cm, porém,

não foi discrepante em relação aos outros designs. A média, considerando os três tipos de rosca é de 0,47 Ton/cm, e é ilustrada em amarelo na figura 9.

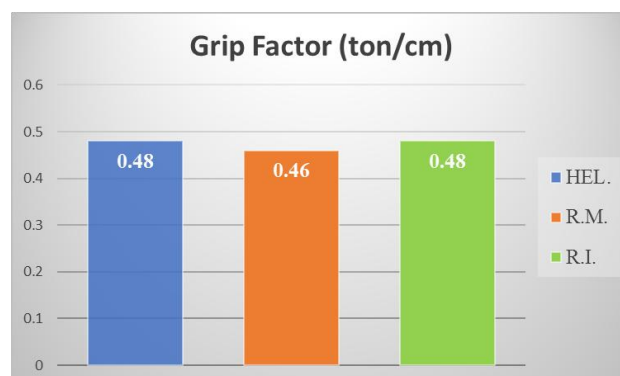


Figura 9. Grip Factor por tipo de design de barra

4.1 Observações relevantes

- Os testes 06 e 08 foram descartados devido a falhas operacionais identificadas durante a instalação.
- Conseguiu-se retirar do furo, após falha de aderência, os tirantes 01 e 09.

Considerando um valor médio de GF de 0,47 Ton/cm, é possível calcular, de acordo com a fórmula (3), o comprimento mínimo de ancoragem necessário para se romper o tirante (aprox. 25 Ton).

$$L_a = \frac{RT_t \text{ (Ton)}}{GF \text{ (Ton/cm)}} \quad (3)$$

L_a – comprimento de ancoragem
 RT_t – Resistência tração do tirante
 GF – Grip Factor

Definido o comprimento mínimo de ancoragem, que nesse caso é 54 cm, elabora-se um diagrama de transferência de carga, onde ilustra o efeito GF no decorrer do comprimento do tirante. Na parte superior, até 54 cm do topo⁵

⁴ Todos testes de tração foram realizados em até 24h após instalação.

⁵ Para elaboração do diagrama de esforços, considera um confinamento total da resina no fundo do furo.

do tirante, a transferência de carga é inferior à resistência tração do aço. Posterior a esse comprimento existe uma transferência de carga máxima.

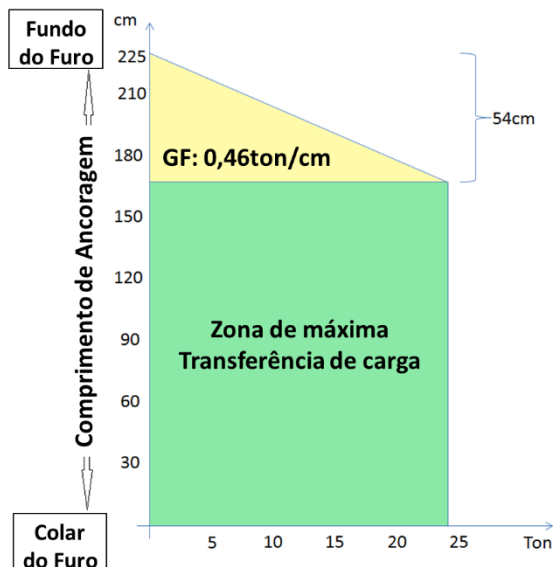


Figura 10. Diagrama de transferência de carga

4.2 Falha de aderência no contato resina/tirante

É possível observar um ótimo comportamento da homogeneização entre resina/catalisador e a trituração da membrana de poliéster, além de se confirmar o fenômeno de confinamento da resina ao final do tirante. A Figura 11(b) apresenta em detalhes os pontos de ruptura cisalhante internamente na resina de poliéster, o que comprova a teoria.

É importante ressaltar o quanto a aderência entre resina/barras/rocha foi eficaz, pois em um comprimento de ancoragem inferior a 25 cm conseguiu-se transferir uma carga de 12,5 ton.

A Figura 11(a) ilustra uma ocorrência comum de não transferência de carga ao final da coluna de ancoragem, devido a ser o local da ancoragem onde não existe confinamento.

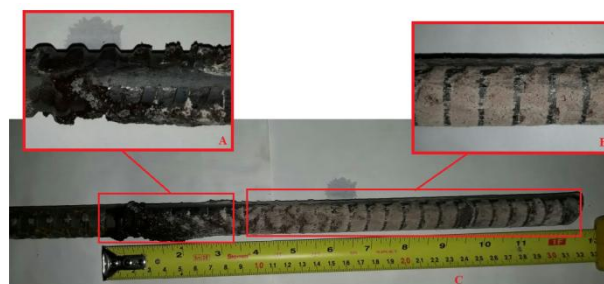


Figura 11(a). ausência de transferência de carga; (b) e (c). pontos de ruptura cisalhante internamente na resina

4.3 Falha de aderência no contato resina/rocha

Observa-se uma trituração total da membrana de poliéster, além de ótimo comportamento da homogeneização entre resina/catalisador.

A Figura 12(a) ilustra as haletas misturadoras sem indícios de resinas aderentes por aproximadamente 15 cm, ou seja, sem ocorrência de transferência de carga, o que confirma que confinamento da resina não ocorreu ao final do tirante.

- Uma possível causa pode estar diretamente ligada as haletas em rotação formarem uma barreira física para o confinamento da resina durante a operação de instalação do tirante.

Durante um esforço de tração (*pull test*), vale ressaltar que as haletas impossibilitam que a falha da aderência ocorra internamente na resina, por cisalhamento, pois as mesmas trabalham como uma barreira. A Figura 12(b) apresenta a resina com uma boa aderência na barra, comprovando a falha no contato rocha/resina.

Apesar do não confinamento da resina no fundo do furo, os 20 cm de ancoragem, como ilustra a Figura 12(c), foram suficientes para garantir uma transferência de carga superior a 13 ton.

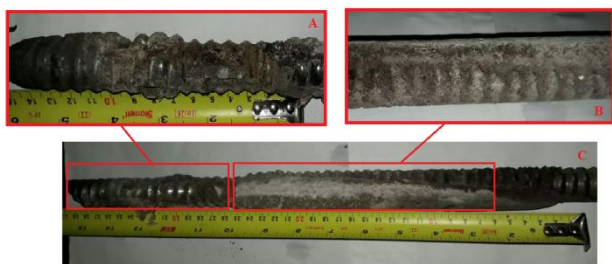


Figura 12(a). ausência de transferência de carga em alguns pontos; (b). falha no contato rocha/resina; (c). limite de preenchimento de resina no tirante

4.4 Testes de arrancamento

Levando em consideração que a operação da Mineração Serra Grande utiliza 3 (três) distintos perfis de barra e todos apresentam um resultado satisfatório nos testes GF, o que pode ser comprovado no resumo dos testes de arrancamento realizados pela equipe de mecânica de rochas da mina demonstrado na tabela 4.

Tabela 4. Testes de arrancamento dos 3 perfis de barra utilizados na MSG em 2018.

Mês	Total	Adequados	Inadequados	% Efetivo
Janeiro	51	50	1	98%
Fevereiro	19	19	0	100%
Março	42	40	2	95%
Abril	27	27	0	100%
	139	136	3	98%

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que todos os três tirantes testados possibilitam uma boa homogeneização da base resina com catalisador e uma transferência de carga efetiva. Porém, no quesito confinamento, o tirante R.M., durante a instalação, impossibilitou o confinamento total da resina no fundo do furo, devido as haletas misturadoras.

Toda resistência de aderência é dependente do elemento de ligação, que nesse caso, é a resina de poliéster, e a mesma, varia sua resistência de acordo com a qualidade da matéria prima (poliéster, agregados, etc), ou seja, qualquer variação de qualidade dos

cartuchos de resina, estudos SEPT e GF deverão ser executados como comparativos.

Sugere-se conhecer a zona de plastificação real das escavações de desenvolvimento, na litologia em estudo, correlacioná-la com as cunhas projetadas das discontinuidades mapeadas das galerias para se concluir qual é o início da zona elástica, ou seja, o ponto inicial de onde o tirante pode-se ancorar.

Concluiu-se que o comprimento mínimo de ancoragem necessário, em uma zona de “rocha sã”, para se romper o tirante é de 540 mm utilizando um *Grip Factor* médio de 0,47 Ton/cm.

Recomenda-se instrumentar o sistema de atirantamento para entender os reais esforços que os mesmos estão recebendo do MR e quantificar os pontos exatos dessa transferência de carga, buscando calibrar o dimensionamento de ancoragem utilizado que é atualmente definido por classificações geomecânicas.

Como estudos futuros, sugere-se executar GF para todas as litologias da Mina, buscando avaliar se existe variação de resistência de aderência do sistema de atirantamento entre os litotipos.

Todas as sugestões e recomendações aqui apresentadas devem ser entendidas como um guia para otimização e efetividade de todo processo de atirantamento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio incondicional da Mineração Serra Grande, em especial às equipes de Mecânica de Rochas e Operação de Mina pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- Aziz, N and Jalalifar, H. (2005). *Investigation into the transfer mechanism of loads in grouted bolts*, Australian Geomechanics Journal. Vol. 40, No.2. 99-113.
- Fabjanczyk, M.W. and Tarrant, G.C. (1992). *Load Transfer Mechanisms in Reinforcing Tendons*, Proceedings of the 11th International Conference on Ground Control in Mining, Wollongong, New South

- Wales, Australia, University of Wollongong, pp. 212-219.
- Gontijo, A. *et al.* (2016). *Parâmetros Relevantes e Críticos que Influenciam no Atirantamento utilizando Cartuchos de Resina de Poliéster*. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, Anais.
- Health and Safety Executive. (1996). *Guidance on the Use of Rockbolts to Support Roadways in Coal Mines*, U.K., Health and Safety Executive, Deep Mines Coal Industry Advisory Committee.
- I. Canbulat, A. Wilkinson and G. Prohaska. (2006). *Roof Bolting Guidelines in South African Collieries*, Groundwork Consulting (Pty) Ltd, March 2006.
- Karabin, G.J. and Debevec, W.L. (1976). *Comparative Evaluation of Conventional and Resin Bolting Systems*, MESA IR 1033, 22 pp.
- Kilic, A., Yasar, E. and Atis, C. D. (2002). *Effect of bar shape on the pull out capacity of fully grouted rock bolts*, Tunneling & Underground Space.
- Mark, C., Compton, C., Oyler, D. and Dolinar, D. R. (2002). *Anchorage pull testing for fully grouted roof bolts*. In: Peng SS, ed. *Proceedings of the 13th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV: West Virginia University.
- Peter Craig, Naj Aziz, Jan Nemcik and Arash Moslem. (2014). *Evaluating methods of underground short encapsulation pull testing in Australian coal mines*, 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia.