

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

IGOR ALMEIDA SAMPAIO

COMPORTAMENTO MECÂNICO E ACÚSTICO EM ARENITOS SUBMETIDOS AO
CICLO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.

Porto Alegre, 2018

IGOR ALMEIDA SAMPAIO

Engenheiro de Minas/ Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e Logística e Cadeia de Suprimentos.

COMPORTAMENTO MECÂNICO E ACÚSTICO EM ARENITOS SUBMETIDOS AO
CICLO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Porto Alegre, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

CIP- Catalogação na Publicação

Sampaio, Igor Almeida
Comportamento mecânico e acústico em arenitos
submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento /
Igor Almeida Sampaio. -- 2018.

91 f.

Orientador: André Cezar Zingano.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Gaseificação do Carvão em Subsolo. 2. Arenito.
3. Ensaio Acústico. 4. Aquecimento e Resfriamento.
5. Propriedades Mecânicas. I. Zingano, André Cezar,
orient. II. Título.

IGOR ALMEIDA SAMPAIO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO E ACÚSTICO EM ARENITOS SUBMETIDOS
AO CICLO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.**

A dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. André Cezar Zingano

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Jorge Dariano Gavronski (Doutor em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): _____

Paulo Salvadorette (Doutor em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): _____

Roberto Heemann (Doutor em Engenharia) - Pontifício Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS): _____

AGRADECIMENTO

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela oportunidade de realizar o Mestrado Acadêmico. Ao Prof. Dr. André Cezar Zingano, pela oportunidade e aceitação para o ingresso no programa, apoio durante o período acadêmico e pela oportunidade para a realização deste Trabalho. Ainda devo agradecer a amizade criada durante o período que estive no Rio Grande do Sul, aos Bolsistas de Iniciação Científica Marcos Vinicius Silva Cezar, Maurício Gabanna Zucchetti e aos Mestrandos José Guilherme Mourão Dantas e Kaio Andretta Araujo Silva que sempre me incentivaram e apoiarão nas horas oportunas, a Central Analítico do Instituto de Engenharia de Química da UFRGS em fornecer com agilidade os resultados dos ensaios térmicos e análise química e finalmente ao CNPQ pela provisão da bolsa de Mestrado.

RESUMO

Com o aumento crescente das restrições ambientais acompanhado do aumento crescente da demanda energética e matéria-prima pela população que cresce em proporções assustadoras com poucos indícios de sua descida fizeram com que buscassem alternativas com viabilidade econômica e reduzisse os impactos ambientais. Para o carvão mineral, a alternativa encontrada é a Gaseificação do Carvão em Subsolo. Das vantagens encontradas com o processo, as mais interessantes são: a segurança operacional e pouca infraestrutura necessária, competitividade no preço do produto gerado (gás sintético) e pouco gerenciamento do rejeito produzido já que as cinzas são deixadas nas cavidades em subsolo. Uma das dificuldades encontradas é mostrar a mudança do comportamento mecânico e acústicos das rochas e maciço rochoso quando submetido a alta temperatura ou pós-operacional com o resfriamento das cavidades geradas durante o processo. O maciço rochoso, o sistema de fraturas e as suas propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração) e as propriedades física (permeabilidade e anisotropia) influenciam o *design* operacional do processo. Com os resultados obtidos foi possível uma interdependência linear entre as velocidades das ondas P e S, essa mesma interrelação foram observadas antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9177 e 0,9472, respectivamente. As velocidades das ondas P e S são reduzidas com a temperatura. A redução é mais evidente na onda P com redução máxima de 39% do valor inicial. A velocidade da onda S é reduzida continuamente a partir dos 800°C, passando de 7 % para 3% da velocidade inicial. A regressão feita com a resistência à compressão dos ensaios triaxiais diverge dos resultados obtidos nos ensaios uniaxiais. Os resultados da resistência à tração e os de resistência à compressão apresentaram aumento e redução da resistência em diferentes temperaturas. A resistência à compressão não apresentou qualquer regressão com as velocidades ultrassônicas, enquanto que o módulo de Elasticidade estático apresentou uma regressão linear crescente com a velocidade da onda P com coeficiente de determinação (R^2) de 0,7922.

Palavras-Chave: Gaseificação do Carvão em Subsolo. Arenito. Ensaio Acústico. Aquecimento e Resfriamento. Propriedades Mecânicos.

ABSTRACT

With the increasing increase of environmental restrictions, accompanied by an increasing increase in energy and raw material demand by the population that grows to frightening proportions with little evidence of their descent, they have sought to find alternatives with economic viability and reduce environmental impacts. For coal, the alternative found is Coal Gasification in Subsoil. Of the advantages found in the process, the most interesting are: operational safety and little infrastructure required, competitiveness in the price of the product generated (synthetic gas) and little management of the waste produced since the ashes are left in the underground cavities. One of the difficulties is to show the change in the mechanical and acoustic behavior of rocks and rock mass when submitted to high temperature or post-operational with the cooling of the cavities generated during the process. The rock mass, the fracture system and its mechanical properties (compressive strength and tensile strength) and physical properties (permeability and anisotropy) influence the operational design of the process. With the results obtained, a linear interdependence between the P and S velocities was possible. This same interaction was observed before and after the heating and cooling cycle with coefficient of determination (R^2) of 0,9177 and 0,9472, respectively. P and S wave velocities are reduced with temperature. The reduction is more evident in the P wave with a maximum reduction of 39% of the initial value. The S wave velocity is continuously reduced from 800 ° C, from 7% to 3% of the initial velocity. The compressive strength with the triaxial tests differs from the results obtained in the uniaxial tests. The results of the tensile strength and the compressive strength showed increase and reduction of the resistance with different temperatures. The compressive strength did not show any regression with the ultrasonic velocities, while the static elasticity modulus presented an increasing linear regression with the P-wave velocity with determination coefficient (R^2) of 0,7922.

Key-Words: Underground Coal Gasification. Sandstone. Acoustic Testing. Heating and Cooling. Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) e (b) representam a subsidência gerado nas Minas de Carvão no Oeste da Virgínia.....	18
Figura 2. Processo simplificado da Gaseificação do Carvão em Subsolo.....	19
Figura 3. Apresentação do (a) Furos verticais ligados, (b) Ponto de Injeção de controle dos agentes gaseificadores e retráteis (L-CRIP e P-CRIP) e (c) Camadas de Carvão Inclinadas. .	21
Figura 4. Testes Pilotos da Gaseificação do Carvão em Subsolo desenvolvidos ao redor do mundo.....	22
Figura 5. Gaseificação do Carvão em Subsolo na África.....	23
Figura 6. Equipamento de Corand Schlumberger em 1935. O equipamento seria feio para escutar os sons vindos do interior do furo, vindo dos receptores de numeração 3 e 4.....	24
Figura 7. Formas de propagação das ondas P e S. (a) As ondas P (Wave-P) se propagam na direção longitudinal ao corpo de prova enquanto que a ondas S (Wave-S) se propagam perpendicularmente ao corpo de prova.....	26
Figura 8. Detecção da onda Característica da onda em corpos de prova.	27
Figura 9. Redução da amplitude das ondas P e S em função do mergulho da descontinuidade.	28
Figura 10. Identificação das ondas e seus respectivos tempos de recepção.....	29
Figura 11. (a) Aplicação de uma força tracional, (b) Aplicação de uma força de compressão e (c) Aplicação de uma força cisalhante é importante observar a medida de θ	32
Figura 12. Velocidade da onda P (a) antes e (b) depois submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento.....	35
Figura 13. Velocidade da onda S (a) antes e (b) depois de serem submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento.....	36
Figura 14. Relação entre os tempos de trânsito da Onda P e S em diferentes rochas, a mesma relação é obtida entre as velocidades.....	36
Figura 15. Relação V_p e V_s em Arenitos.....	37
Figura 16. Resistência a Compressão Uniaxial com a Temperatura em Arenitos.....	38
Figura 17. Experimento em Grandes Blocos em Centralia. Podemos evidenciar em Branco, a zona afetada da camada de carvão, e em laranja o formato assimétrico da cavidade gerada durante o UGC.....	40
Figura 18. Resistência a Compressão em diferentes pressões Confinantes em Arenitos.....	41
Figura 19. Módulo de Elasticidade Estático em diferentes pressões Confinantes em Arenitos.	41
Figura 20. Variação da Resistência a Tração em Arenito e Halita com a Temperatura.....	42
Figura 21. Equipamento Core Trimmer para preparação dos corpos de prova.....	44
Figura 22. Análise Térmica Diferencial Exploratória (Linha Azul) e Análise Termogravimétrica (Linha Verde).....	46
Figura 23. Análise do Difractometria de Raio X na amostra 01.....	47
Figura 24. (a) As amostras antes do tratamento térmico e em (b) Amostras após o tratamento térmico.....	48
Figura 25. Equipamento PUNDIT, modelo PL 200, Marca Proceq.....	48
Figura 26. Valores obtidos e regressão linear com coeficiente de determinação antes do tratamento térmico.....	50
Figura 27. Valores obtidos e regressão linear com coeficiente de determinação depois do tratamento térmico.....	51

Figura 28. Redução da velocidade das ondas P e S com a temperatura.	52
Figura 29. Atenuação (Q) da onda P e S em temperatura.	53
Figura 30. Variação da resistência à compressão com a temperatura.	56
Figura 31. (a)Regressão entre a Resistência à compressão com o V_p e V_s e (b)Módulo de Elasticidade Estático com a V_p	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidade da Onda Compressiva e Tempo de trânsito de algumas rochas e líquidos.	30
Tabela 2. Regressão das propriedades Elásticas Dinâmicas com a densidade e as velocidades das ondas P e S.	33
Tabela 3. Resumo das propriedades acústicas antes do tratamento térmico.	49
Tabela 4. Resumo das propriedades acústicas depois do tratamento térmico.	50
Tabela 5. Resultados dos Ensaio Triaxiais	55
Tabela 6. Resultados dos Ensaio Uniaxiais.	55
Tabela 7. Resultados dos Ensaio de Tração Indireta	56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CBM: Coalbed Methane;
UCG: Underground Coal Gasification;
CCUS: Carbon Capture, Uses and Storage;
SNG: SynGas;
MBG: Medium Btu Gas;
LBG: Low Btu Gas;
 $H_{2(g)}$: Gás Hidrogênio;
 $CO_{(g)}$: Gás Monóxido de Carbono;
 $CO_{2(g)}$: Gás Dióxido de Carbono;
 $CH_{4(g)}$: Gás Metano;
LWV: Linked Vertical Well;
GHG: GreenHouse Gas;
CRIP: Controlled Retracting Injection Point;
SDS: Steeply Dipping Beds;
ITT: Interval Time Transit;
K: Módulo de Massa;
G: Módulo Cisalhante;
E: Módulo de Elasticidade Estático;
v: Razão de Poisson;
 ϵ_t : Elongação Transversal;
 ϵ_l : Elongação Longitudinal;
E dinâmico: Módulo de Elasticidade Dinâmico;
G dinâmico: Módulo Cisalhante Dinâmico;
K dinâmico: Módulo de Massa Dinâmico;
ASTM: American Society Testing and Materials;
 σ_c : Resistência à Compressão Uniaxial;
LVDT: Linear Variable Differential Transformer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO	16
2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO E PESQUISAS NA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO	17
2.2. DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO AO REDOR DO MUNDO.....	21
3. MUDANÇA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICAS EM ROCHAS QUANDO SUBMETIDAS A ALTA TEMPERATURA.	24
3.1. DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS SÔNICOS	24
3.2. MÉTODO DE OBTENÇÃO DAS ONDAS COM OS EQUIPAMENTOS LABORATORIAIS	26
3.3. RESUMO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS	30
3.4. EFEITO DA TEMPERATURA	33
3.4.2. Resistência à compressão com a temperatura	37
3.4.3. Resistência à compressão em diferentes pressões confinantes com a temperatura.....	39
3.4.4. Resistência à tração com temperatura	41
4. METODOLOGIA, RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSÕES	42
4.1. FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL.....	42
4.2.1. Pulverização e Análise Térmica da amostra 01	44
4.3. TRATAMENTO TÉRMICO DAS AMOSTRAS DE ARENITO	47
4.4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS	48
4.5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO	49
4.6. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DEPOIS DO TRATAMENTO TÉRMICO	50
4.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A ALTA TEMPERATURA	54
Fonte: Aatoria Própria, 2018.	56
5. CONCLUSÕES	57
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
7. REFERÊNCIAS	58
ANEXO 1 - Comparação dos Corpos de Prova antes e depois do Ciclo de Aquecimento e Resfriamento;	
ANEXO 2 - Corpos de Prova Ensaeados;	
ANEXO 3 - Mudanças Perceptíveis nos Corpos de Prova com o Ciclo de Aquecimento e Resfriamento;	
ANEXO 4 - Corpos de Prova submetidos aos ensaios de Tração Indireta;	

ANEXO 5 - Comparação com trabalhos anteriores;

ANEXO 6 – Ondas sônicas nas amostras antes do Ciclo de Aquecimento e Resfriamento.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade cresce em proporções assustadoras com pouca probabilidade que irá descer. O aumento populacional é visto principalmente em países que estão em desenvolvimento (**BLINDERMAN e KLIMENKO, 2018**) com aumento da demanda de alimentos, vestuário, medicamentos e energia.

Os combustíveis fósseis em destaque o carvão mineral é descrito nos antigos manuscritos de George Bauer e do filósofo grego Aristóteles (**ROGERS *et al.*, 1994**). As primeiras operações unitárias de exploração do carvão mineral foram iniciadas somente em 1748 (**KENTUCKY COAL EDUCATION, 2018**). O petróleo é descoberto em 1860 (**QUADAR, 2014**) tornando a partir dessa data a fonte primária de fornecimento de energia mundial.

O carvão mineral é considerado o “diamante negro”, um alótropo raro (**MERRIT, 1986**) essa denominação veio da abundância do carvão mineral e sua distribuição geográfica em todos os continentes, mesmo que espacialmente irregular (**PAZDZIORA, 1988; ROGERS *et al.*, 1994, SEIDLE, 2011 e THAZUR, 2017**). As reservas de carvão mineral possuem maior volume do que os outros combustíveis fósseis (**PAZDZIORA, 1988**). A primeira reserva mineral a ser descoberta foi o carvão mineral e utilizado desde os tempos pré-histórico, e infelizmente uma das últimas reservas a ter seu potencial totalmente explorado, com a exploração de depósitos não convencionais. O seu destaque veio com a Revolução Industrial (**MERRIT, 1986**) como redutor na fabricação do aço.

As últimas décadas foi marcada pela maior preocupação com o meio ambiente, evidenciado pelo Protocolo de Kyoto, Conferência Eco-92 e Rio + 20. As convenções feitas com esse propósito foram acompanhadas pelo renovado interesse pelos processos de alta complexidade como alternativa de viabilidade técnico-econômica para a redução do passivo ambiental e em termos de engenharia são consideradas técnicas elegantes. O carvão mineral é encontrado alternativa para reduzir os impactos ambientais que são: A Exploração Natural do Gás das camadas de carvão (CBM) e a Gaseificação do Carvão em Subsolo (UCG) que teve a sua idealização ainda no século XIX.

Os primeiros testes pilotos para o aproveitamento do produto gasoso foram realizados na Rússia e rapidamente expandiu ao redor do mundo com consequência primária o aumento das reservas minerais consideradas antes não-mineráveis por alguma restrição econômica e/ou técnica, que inclui as antigas minas de carvão abandonadas, finas camadas de carvão, camadas

de carvão com alto teor de contaminantes e teor de cinzas e minas profundas. As cavidades geradas pela Gaseificação podem ainda ser utilizadas para o sequestro de carbono (CCS).

São inúmeras as vantagens e desvantagens do processo de Gaseificação do Carvão em Subsolo discutidas pelos autores **Riet (2010)**, **Moran et al. (2013)**, **Yang et al. (2014)**, **Pershad (2016)**, **Green (2018)** e **Kale (2018)**. Dentre as vantagens são:

- O projeto conceitual do processo é simples;
- No planejamento estratégico longo prazo há independência de outras fontes não renováveis.
- O preço do gás gerado tem se mostrado competitivo com os custos energéticos;
- Segurança nas operações, já que as operações são realizadas em superfície;
- Flexibilidade Operacional, já que diversos métodos podem ser utilizados para o desenvolvimento do método: construção de galerias, combustão reversa, CRIP e *Eletrolinking*.
- Os subprodutos gasosos são valiosos e utilizados pela indústria de base;
- As cinzas e escória são deixadas em Subsolo.

As desvantagens do processo são:

- O projeto de perfuração direcional tem que possuir informações precisas;
- A prática operacional do processo tem se mostrado complexo;
- A qualidade e a quantidade dos gases gerados são incertas e variáveis;
- Não há previsibilidade do comportamento mecânico do maciço rochoso com a tensão térmica, durante e pós-operação;
- Subsidência da Superfície pode se tornar desastrosa em formações com pouca cobertura;
- Contaminação da água Subterrânea.

Foram mencionadas algumas vantagens e desvantagens, mas lista pode se estender bastante nos aspectos positivos e negativos do processo.

O acesso as camadas de carvão profundas têm sido facilitadas pela coincidência das operações e processos ser constantemente evoluídos e utilizados pela indústria do petróleo. O funcionamento do processo é simples, mas existe ainda a dificuldade para o entendimento e controle dos condicionantes que fazem parte do processo. E para o seu bom funcionamento são necessários uma equipe de profissionais com conhecimento em diversas áreas do conhecimento (**BLINDERMAN e KLIMENKO, 2018**).

Uma das dificuldades encontradas é o pleno entendimento das mudanças do comportamento físico, mecânico e mineralógico do maciço rochoso no curto e longo prazo. Uma vez que a reserva mineral pode se encontrar já em condições ambientais críticas com pressões e temperaturas elevadas (**KOMAR,1971**).

A literatura internacional já evidencia o comportamento mecânico e as características acústicas da rocha intacta com a temperatura, inclusive o desencadeamento e formação de novas estruturas. Essas estruturas são formadas com o aumento da temperatura. O processo de perfuração, transporte, manuseio ou mudanças climáticas causam as denominadas fraturas induzidas (**KULANDER et al.,1990; LORENZ & COOPER, 2018**), então é necessário diferenciá-las. Um importante cuidado a ser tomado é durante a confecção dos corpos de prova, com destaque para aquelas com poucas descontinuidades (**VILLAESCUSA, 2014**).

Os métodos acústicos ou também conhecidos como os métodos sônicos possuem várias aplicações para a engenharia, principalmente no campo de petróleo, onde se deu a origem do método pelas exaustivas regressões com confiabilidade para estimar as propriedades físicas principalmente da rocha reservatório. A aplicação do método migrou para a Engenharia Civil, Engenharia de Minas, Engenharia de Biosistemas e para as Ciências Veterinárias (**BARTON, 2007**).

As características acústicas sofrem influências de diversos fatores, que incluem de maneira generalizada os fatores estruturais, ambientais e operacionais durante a sua medida e as características acústicas devem ser tomadas com cuidado. O entendimento das propriedades acústicas como a redução da velocidade e/ou do tempo de trânsito das ondas ultrassônicas em ambientes de alta pressão e temperatura, inclusive em condições posteriores a operação são informações críticas para o processo, essa informação faz parte da experimentação realizada em laboratório o que ajuda a entender o comportamento em campo.

1.1.MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO TRABALHO

A motivação para a realização deste trabalho veio do interesse particular em mostrar as mudanças mecânicas e acústicas das rochas quando submetidas ao ciclo de aquecimento e resfriamento.

Diferentemente do processo da fabricação do aço, a rocha é composta por minerais que são modificados e sofrem influência térmica com a alta temperatura e o fluxo gasoso do

processo de gaseificação do carvão em subsolo. A tensão térmica criada muda as propriedades mecânicas e as características acústicas da rocha intacta e do maciço rochoso.

1.2.OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo central do trabalho é verificar a influência do comportamento mecânico e as características acústicas quando os corpos de prova são submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento.

Além disso, é possível quantificar objetivos secundários como medir a redução da velocidade das ondas P e S, a razão da redução das ondas ultrassônicas depois que as amostras são submetidas ao ciclo de aquecimento e resfriamento.

As aplicações na engenharia geotécnica e na engenharia dos materiais com as rochas submetidas a alta temperatura são mencionadas internacionalmente em diferentes litologias e, portanto, a agilidade na obtenção e padronização dos resultados é um requisito indispensável. É necessário ainda obter uma estimativa por regressão das propriedades mecânicas com as propriedades acústicas e compará-las com a literatura vigente.

1.3.ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, é feita a introdução, os objetivos gerais e secundários, a organização do trabalho e a motivação para a realização do trabalho.

No capítulo 2 evidencia o processo da Gaseificação do carvão em subsolo, de maneira sucinta, incluindo uma introdução histórica, o produto gasoso gerado e os subprodutos de grande interesse na indústria química e alguns testes pilotos realizados ao redor do mundo.

No capítulo 3 é contextualizado com a bibliografia consultado o comportamento acústico e mecânico das rochas, em evidência arenitos, quando submetidos a alta temperatura.

No capítulo 4 é descrito a metodologia e as normas dos ensaios utilizados para a confecção deste trabalho, as discussões e os resultados obtidos durante a experimento antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento.

No capítulo 5 são geradas as conclusões experimentais dos ensaios.

E finalmente o capítulo 6 é referenciado todo o material didático utilizado para a confecção deste trabalho.

2. GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO

2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO E PESQUISAS NA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO

A primeira concepção da gaseificação do carvão em superfície surgiu com William Murdock em 1792 (**SIMBECK *et al.*, 1993, SEIFI, 2004**). A concepção de que seria possível desenvolver um processo similar desenvolvido por Murdock em subsolo foi sugerido em 1868 em uma visita técnica realizada na Mina de Carvão em Washington (**BLINDERMAN & KLIMENKO, 2018**) por Dmitri Mendeleev (**KLIMENKO, 2018**).

Em relação ao desenvolvimento e a concepção do processo, a literatura apresenta-se muitas vezes confusa e sem datas precisas. Em **Bakulev (1962)** a concepção do processo deu-se somente em 1880, **Klimenko (2018)** e **Saptikov (2018)** afirmam que a concepção da Gaseificação do Carvão em Subsolo foi desenvolvida somente em 1888 e a idealização foram feitas por William Ramsay e Dmitri Mendeleev, simultaneamente.

Em **Hartman (1987)** a Gaseificação do Carvão em Subsolo (UCG) junto com outros métodos não convencionais são denominados de métodos inovadores (*Novel*). Eles levam esse nome por fugir dos métodos convencionais de Lavra a Céu Aberto e Subterrâneos. Além da gaseificação do carvão em subsolo é mencionada as técnicas de Escavação Rápida (*Tunnel Boring Machine*, mineradores contínuos em Subsolo e os Escarificadores em Superfície), a Automação e a utilização da robótica na Mineração com os *Trolley Assist*, Mineração Hidráulica, *Coalbed Methane* ou *Coalbed Mine Methane* (CBM ou CBMM), *Underground Retorting*, Mineração Oceânica (*Ocean Mining*), Mineração Nuclear *in situ* (*Nuclear Mining*) e Mineração Extraterrestre (*Extraterrestrial Mining*).

O processo da gaseificação em subsolo possui o mesmo objetivo dos gaseificadores em superfície que é a queima do carvão sólido com a geração de gás, denominado de gás sintético ou *Syngas* ou ainda *High Btu Gas* (SNG), *Medium Btu Gas* (MBG) e *Low Btu Gas* (LBG) descrito em **Seifi (2004)**, além dos vários outros subprodutos que são largamente utilizados pela indústria de base. A composição do gás gerado depende de inúmeros fatores e é composto basicamente dos gases H₂, CO, CO₂ e CH₄ (**ANDRIANOPOULOS, 2015**) em diferentes proporções e a composição química varia ao longo dos estágios de avanço do processo.

Desde a sua idealização até os primeiros testes pilotos, o processo de gaseificação do carvão em subsolo teve vários colaboradores que o auxiliou o seu desenvolvimento de forma direta e indireta. A suas ideias nos influenciam até os dias de hoje, dentre eles: William Siemens, Anson Betts e William Ramsay, Dmitri Mendeleev, já mencionado. William Siemens foi um

engenheiro Alemão com interesse inovador na área térmica. O conhecimento de William Siemens melhorou e desenvolveu os dutos que suportam sofrer alta temperatura, melhorou os gaseificadores de superfície e inventou os fornos de regeneração.

Anson Betts idealizou os primeiros *layouts* do processo de Gaseificação *in situ*, sendo o principal deles o *Linked Vertical Well (LVW)* e mencionou que o processo não causaria subsidência, como podemos observar a subsidência em superfície que pode agravar em proporções catastróficas (Figura 1.a e Figura 1.b) com mencionado por **Ingram (1989)** e por fim, William Ramsay realizou o primeiro teste piloto em 1912 na Rússia para utilização do gás gerado para a produção de energia (**KLIMENKO, 2018**).

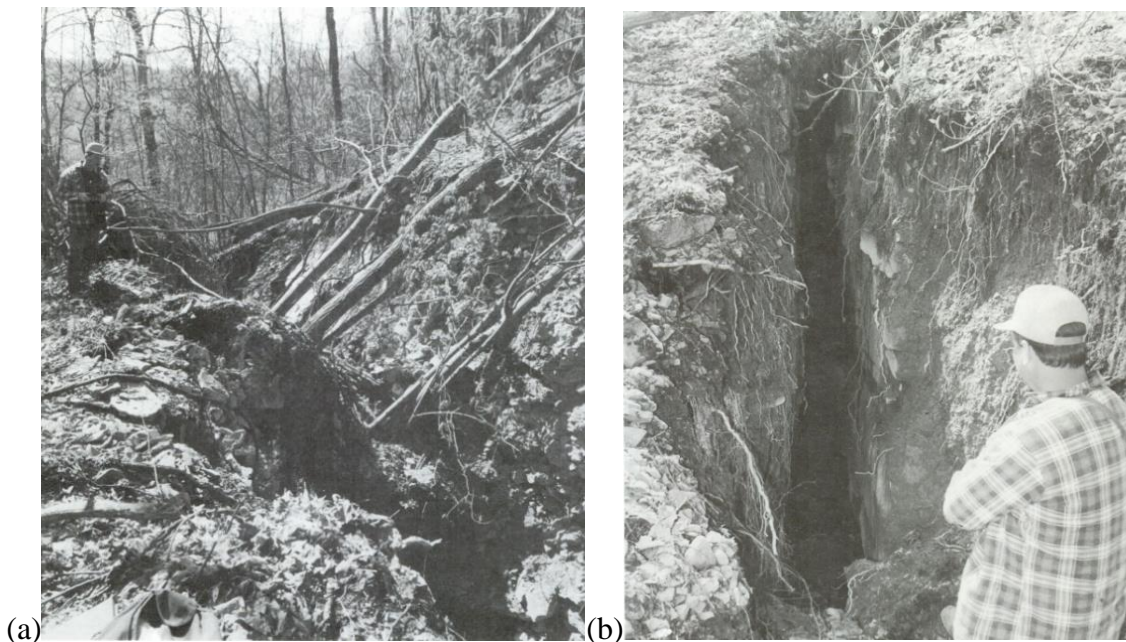


Figura 1. (a) e (b) representam a subsidência gerado nas Minas de Carvão no Oeste da Virgínia.

Fonte: **Ingram (1989)**.

A gaseificação surgiu com uma nova oportunidade para suprir a demanda crescente de matéria-prima na indústria química com a produção de energia limpa (**SEBASTIAN *et al.*, 1951**; **SIMBECK, 1993**; **BLINDERMAN & KLIMENKO, 2018**; **SEIFI, 2004**). Uma das vantagens do processo de gaseificação do carvão em subsolo é a sua aplicabilidade que independe do tipo de carvão a ser gaseificado (**SEBASTIAN *et al.*, 1951**). O processo forma a base para outros processos industriais (**FIGUEIREDO & MOULIJIN, 1985**).

Mesmo sendo uma técnica que gera menor passivo ambiental conforme descrito em **Capp *et al.* (1963)** e **Simbeck (1993)**. A gaseificação do carvão em subsolo é a técnica efetiva para o controle ambiental, as cinzas e escórias são deixadas nas cavidades depois da queima.

Ao contrário da mineração convencional, o carvão mineral não precisa sofrer as operações e processos unitários. Uma das desvantagens apresentadas pelo método é contaminação da água subterrânea e a Subsidência (**BURTON *et al.*, 2004**), conforme relatados em testes pilotos em *Hanna Series* e *Hoe Creek* (**Camp, 2018**).

É importante mencionar que o processo da gaseificação em subsolo é um processo termo-hidro-químico e mecânico (**KASANI, 2015**), o que o torna complexo. A gaseificação do carvão em subsolo é comparável com as técnicas de combustão *in situ*-técnica de recuperação avançada aplicado na indústria petrolífera e inclui os fenômenos de combustão, pirólise, gaseificação e mudanças das propriedades das rochas que circunvizinha o processo (Figura 2) e sofrem com a tensão térmica durante a gaseificação (**SEIFI, 2004**). A falta de entendimento e a complexidade do processo atrasa a sua aplicação rápida mesmo com as diversas tentativas para implementação dos projetos comerciais e pilotos, já que grande parte dos fenômenos que ocorrem dependem das condições ambientais e operacionais (**KASANI, 2016**).

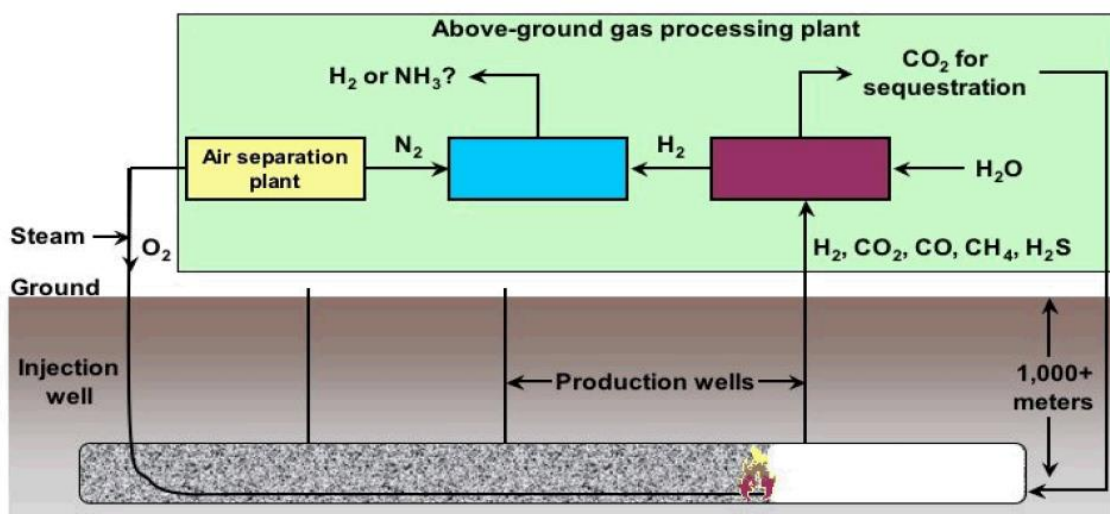


Figura 2. Processo simplificado da Gaseificação do Carvão em Subsolo.

Fonte: Upadhye *et al.*, 2006.

Em **Katell e Faber (1961)** os principais fatores que influenciam nos custos de produção da energia a partir dos gases gerados pela gaseificação do carvão em subsolo são: a influência da coluna de rocha (Pressão Litostática), eficiência térmica, custos diretos de energia, presença de água subterrânea, difusibilidade e perda dos gases pelo sistema de fraturas.

O processo para a gaseificação *in situ* depende do oxidante ou do agente de gaseificação (**ANDRIANOPOULOS *et al.*, 2015**), o carvão pode sofrer combustão parcial (**CAPP *et al.*, 1963**; **SIMBECK, 1993**) com o oxigênio, nitrogênio, vapor de água ou uma combinação destes,

enquanto que o carvão sofre combustão total quando a ignição ocorre com ar atmosférico (CAPP *et al.*, 1963).

Os principais métodos de ignição são: combustão reversa, *Eletrolinking* e CRIP (*Controlled Retracting Injection Point*). Para ter acesso a reserva mineral é feito a construção de galeria ou pela técnica de perfuração direcional- a partir do afloramento ou partindo da superfície (Burton *et al.*, 2004). Enquanto que a técnica a ser aplicada depende de vários condicionantes econômicos e técnicos. Um dos fatores a ser levado em consideração são: o ângulo de mergulho da camada de carvão e o modo de ignição. Os comuns e interessantes *layouts* mencionados na literatura são: *Linked Vertical Well* (LVW), *Linear and Parallel Controlled Retracting Injection Point* (L-CRIP e P-CRIP) e *Steeplly Dipping Coal Seams* (Figura 3).

O *Linked Vertical Well* possui uma maior aplicabilidade em depósitos com pouca cobertura e camadas horizontais. O *Steeplly Dipping Coal Seams* como o próprio nome sugere é aplicada em camadas com alto ângulo de mergulho, as camadas inclinadas são chamadas de SDB (*Stteply Dipping Beds*). O método L-CRIP e P-CRIP são aplicadas as reservas minerais profundas e o carvão mineral é queimado em estágio (SEIFI, 2004; ANDRIANOPOULOS *et al.*, 2015) não existem restrições para a aplicação do método para serem aplicadas em outros condicionantes.

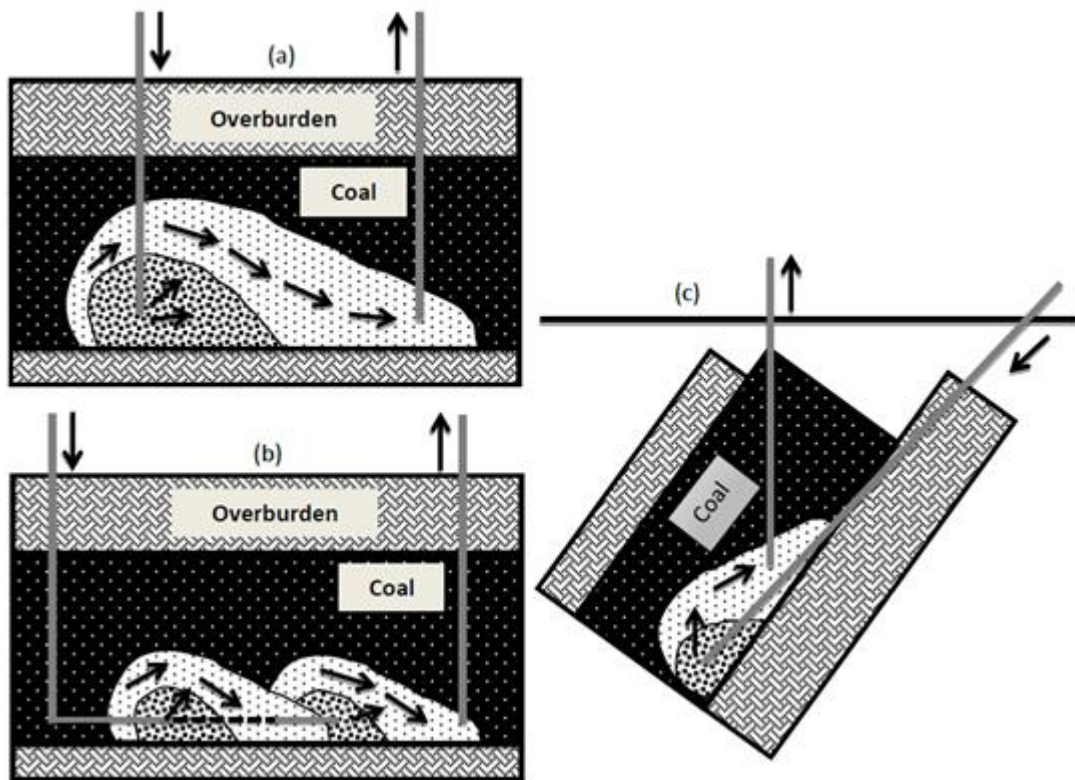


Figura 3. Apresentação do (a) Furos verticais ligados, (b) Ponto de Injeção de controle dos agentes gaseificadores e retráteis (L-CRIP e P-CRIP) e (c) Camadas de Carvão Inclinadas.

Fonte: Seifi, 2004.

Em Seifi (2014) e Orlov (2018) um dos aspectos que chama atenção é o comportamento geomecânica e a influência da temperatura nas propriedades geotécnicas no maciço rochoso em temperaturas superiores a 1000°C. As instabilidades geradas durante o processo podem resultar em perda de calor, gás e a perda da comunicação entre os furos (KASANI, 2016).

2.2. DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO EM SUBSOLO AO REDOR DO MUNDO.

Diversos países realizaram diversos testes pilotos para verificar a viabilidade técnica e econômica para a produção, utilização e comercialização dos produtos derivados do gás produzido, como descrito em Sebastian *et al.* (1951), Elder *et al.* (1957), Katell & Faber (1961), Capp *et al.* (1961), Bakulev (1962), Capp *et al.* (1963), Komar *et al.* (1973) Hill *et al.* (1984), Stephens *et al.* (1984) e Ingram (1989). A realização dos testes pilotos foram desenvolvidos em todos os continentes, os Países destaque são: Estados Unidos, Rússia, França, Bélgica, Holanda, China, Austrália, Índia, Japão e África (Figura 4). Sem mencionar a quantidade de Instituições Privadas e governamentais interessadas no desenvolvimento do processo.

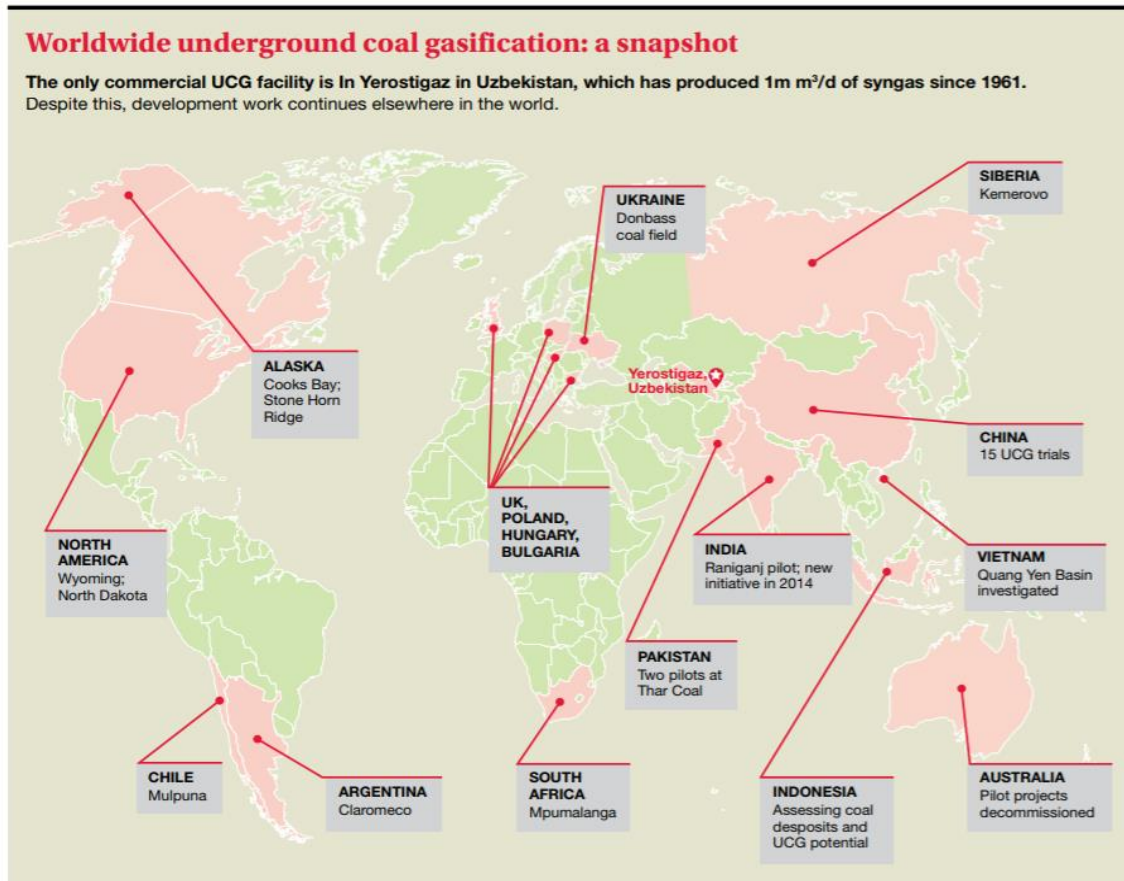


Figura 4. Testes Pilotos da Gaseificação do Carvão em Subsolo desenvolvidos ao redor do mundo.

Fonte: Yang, Sheng e Green (2014).

Na Europa, os testes pilotos realizados foram nas bacias sedimentares *Donbass* e *Podmoskovny*. No total foram realizados 9 testes pilotos, que foram: *Gorlovskaya*, *Podmoskovnaya*, *Lisichanskaya*, *Shakhtinskaya* e *Leninsk-Kuznetsk* alguns destes foram realizados em mais de uma série de experimentos com início em 1933.

O auge do desenvolvimento na Antiga União Soviética é em 1939 com o surgimento das instituições governamentais *UPRPODZEMGAZ* e *VNIPODZEMGAZ*. Todos os testes pilotos mencionados acima são descritos em **Saptikov (2018)** e maiores detalhes são descritos em **Sarhosis et al. (2018)**.

Nos Estados Unidos da América (U.S.A) são destaques os testes pilotos de *Gorgas* (1947-1960), *Hanna Series* (1973-1979), *Rock Hill* iniciado em 1979, *Pricetown*, *Hoe Creek Series*, *Rawlins Series*, *Centralia*, *Texas Lignite*, *Carbon Country* e *Rock Mountain I*, esse último foi o teste piloto com maior amplitude e o final dos testes pilotos realizados nos Estados Unidos da América (U.S.A). Todos os testes pilotos são descritos em **Camp (2018)**.

Os testes pilotos realizados em *Centralia*, Washington (**CAPP et al., 1963; HILL et al., 1984**) é referência por seus inúmeros estudos de viabilidade técnica e econômica. O teste piloto foram realizados com diferentes oxidantes (ar, oxigênio, vapor de água e uma combinação deste em diferentes fluxos), com posterior utilização dos diferentes métodos de produção e injeção com a utilização do *Eletrolinking* (**ELDER et al., 1957**), seguido dos trabalhos de **Capp et al.(1961)** com a melhora da permeabilidade por fraturamento hidráulico .

Com destaque podemos mencionar as reservas de Carvão Mineral da Índia, os volumes são vultuosos que incluem os depósitos de Jharkhand, Odisha, Chhattisgard, West Bengal, Andhra Pradesh, Madhya Pradesh, Maharashtra, Tamilnadu e Rajasthan (**Greenn, 2017**)

Na Austrália, o teste piloto de *Chinchilla* com funcionamento no período de 1999-2004. O projeto teve participação ativa da Universidade *New Castle* com o Professor Ian Steward, do Departamento de Engenharia Química da respectiva universidade (**Walker, 2018**).

Na África (Figura 5) têm destaque os Projetos *Majuba* (**Pershad et al., 2018**), Soutpansberg, Waterberg, Springbok Flats, Highveld (projeto piloto em funcionamento) com produção estimado de 30 GWatts, Frre State, Eastern Cape (**Pershad, 2016**).

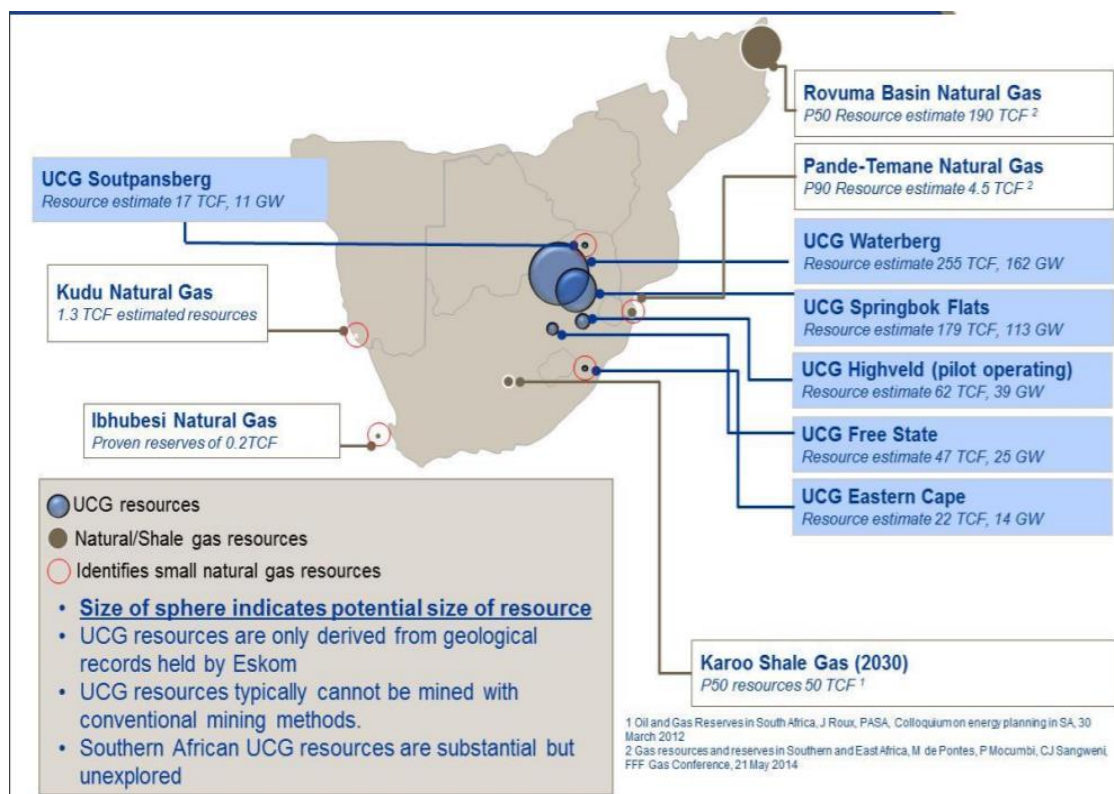


Figura 5. Gaseificação do Carvão em Subsolo na África.

Fonte: **Pershad (2016)**.

3. MUDANÇA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICAS EM ROCHAS QUANDO SUBMETIDAS A ALTA TEMPERATURA.

3.1. DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS SÔNICOS

O desenvolvimento dos métodos sônicos se deu em grande parte a exploração no campo do Petróleo (TITTMAN, 1986; BASSIONI, 1994, CHIN, 2004) e as boas práticas nas disciplinas de perfuração, completação de poço e na engenharia de reservatórios (BASSIONI, 1994; ELLIS e SINGER, 2007). O destaque veio com a aplicação direta na Engenharia de reservatórios e finalidade bélica (ELLIS e SINGER, 2007).

Os irmãos Schlumberger com o seu espírito empreendedor iniciaram um novo negócio que se iniciou com o aluguel dos equipamentos para realizar a perfilagem geofísica mesmo que de forma rudimentar (Figura 6). Concomitantemente Conrad Schlumberger iniciou o desenvolvimento do primeiro protótipo de uma sonda sônica para ser colocados dentro dos furos, mas a primeira tentativa não teve sucesso, o sucesso experimental veio somente em 1951 com a *Geophysical Research Company* conseguindo registrar um perfil de velocidade com profundidade conhecida, fornecendo detalhes do tempo-profundidade no furo (CLOSE *et al.*, 2009).

Ellis e Singer (2007) mencionam que o problema encontrado é a regressão entre o tempo de trânsito e a velocidade das ondas sônicas em diferentes tipos de rocha. O êxito veio com o fim da Segunda Guerra Mundial com o aumento das pesquisas desenvolvidas pelas empresas Mobil, Esso e Shell (CLOSE *et al.*, 2009).

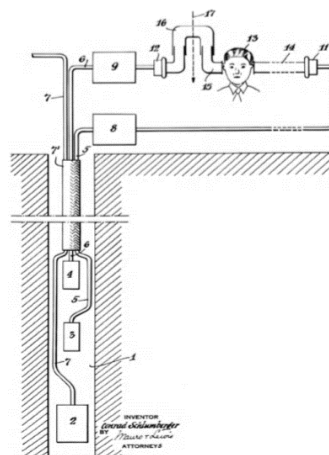


Figura 6. Equipamento de Conrad Schlumberger em 1935. O equipamento seria feito para escutar os sons vindos do interior do furo, vindo dos receptores de numeração 3 e 4.

Fonte: Ellis e Singer, 2007.

O princípio técnico das medidas sônica consiste na emissão de um pulso energético (SERRA, 2008), que pode ser gerado por explosões na superfície (CLOSE *et al.*, 2009) produzido pelos transmissores em superfície ou em subsolo e recebidos por receptores como os atuais Geofones, Hidrofonos e as sondas de perfilagem (ELLIS e SINGER, 2007). As ondas percorrem e sofrem sucessivos fenômenos de reflexão e refração na rocha.

A aplicação dos métodos sônicas passou a ser usada intensamente nas Ciências da Terra, mais o desenvolvimento a levou a ser utilizado nas Ciências Veterinárias com detecção de doenças em animais e na Engenharia de Biosistemas (BARTON, 2007). Na Engenharia Geotécnica a estimativa das propriedades mecânicas com as características acústicas é de grande importância pela agilidade e os menores custos para a obtenção dessa informação.

A medida das ondas sônicas com a utilização do perfilador geofísico não é a primeira categoria das medidas geofísicas a ser medida, a primeira tentativa é em 1927 quando os Irmãos Schlumberger e poucos outros pesquisadores geraram um perfil de condutividade em um campo maduro de petróleo na França (ELLIS e SINGER, 2007).

A perfilagem geofísica consiste na colocação dos equipamentos dentro dos furos abertos com a medição de alguma propriedade da rocha e que tenha interesse particular. Hoje a mesma sonda é possível obter diversas informações geofísicas. O perfilador em sua grande maioria é composta por diversos sensores, conexões eletrônicas e não podemos esquecer os centralizadores *Blowsprings*, a depender do equipamento é necessário que o furo seja preenchido com fluido (TITTMAN, 1986). As medidas são apresentadas em um perfil (*log*).

É importante mencionar que a amostragem dos testemunhos obtidos pela perfuração *Sidewall Corring*, *Bottom Hole Coring* e a perfilagem geofísica são técnicas diferentes, mas se complementam e alguns perfis necessitam de calibração com os dados amostrais das rochas recuperáveis na sondagem (TITTMAN, 1986).

Com o desenvolvimento dos métodos sônicas e dos equipamentos, além da estimativa das propriedades físicas, hoje as diversas técnicas de perfilagem geofísica estimam a densidade das rochas, tensões *in situ*, elementos constituintes, argilas, presença e orientação das discontinuidades, ocorrência de elementos radioativos (TITTMAN, 1986; BASSIONI, 1994) e mais recentemente a técnica está utilizada com sucesso para verificar a qualidade na cimentação dos poços e localizar a presença das dissoluções carbonáticas e cavernas (BASSIONI, 1994).

A perfilagem geofísica sônica é caracterizado pela recepção de uma onda característica, que em escala laboratorial atravessa o corpo de prova enquanto que em escala de campo, consiste na recepção das ondas que viajam no interior e no entorno do furo (**BASSIONI, 1994**). A medida mais conhecida é conhecida como o tempo de trânsito ou ITT (*Interval Transit Time*) ou ainda o *Slowness*.

As ondas recebidas podem ser vários, dentre elas: as ondas compressivas chamadas de: onda de dilatação, não rotacionais, longitudinal ou primária, as cisalhantes também conhecidas como: ondas torcionais, rotacional, transversais ou secundária (Figura 7), ondas *Stoneley* e as ondas *Pseudo-Rayleigh* (**TITTMAN, 1986**), sendo as duas últimas de menor importância nesse trabalho.

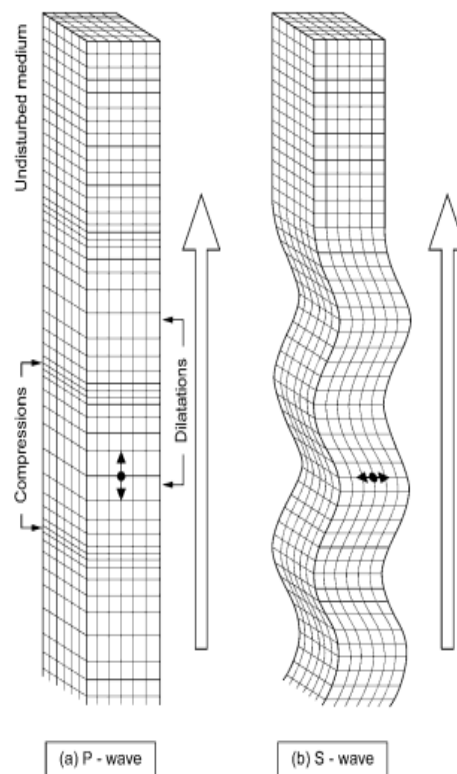


Figura 7. Formas de propagação das ondas P e S. (a) As ondas P (Wave-P) se propagam na direção longitudinal ao corpo de prova enquanto que a ondas S (Wave-S) se propagam perpendicularmente ao corpo de prova.

Fonte: **Barton, 2007**.

3.2. MÉTODO DE OBTENÇÃO DAS ONDAS COM OS EQUIPAMENTOS LABORATORIAIS

As técnicas sônicas e ultrassônicas ampliaram bastante a área de atuação do método. As técnicas sônicas são conhecidas pela fácil aplicação e as características acústicas são obtidas

sem destruir as amostras (**KILIÇ, 2006**). A obtenção da onda característica e do tempo de trânsito é visto na figura 8.

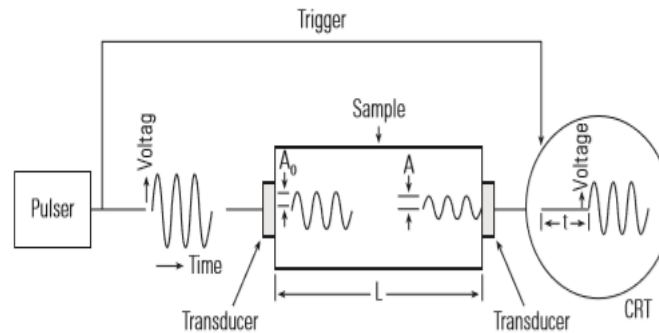


Figura 8. Detecção da onda Característica da onda em corpos de prova.

Fonte: Ellis e Singer (2007).

Em **Altindag (2012)** mostra a aplicação das propriedades acústicas na mineração, dentre elas consiste em determinar o tipo de reforço a ser utilizado, avaliar a eficiência do desmonte de rocha e sua área de influência, determinar a deformabilidade da rocha e junto com outras técnicas de perfilagem chegam a caracterizar e classificar o maciço rochoso. **Barton (2007)** complementa as aplicações da perfilagem sônica com a determinação do grau de fraturamento, espaçamento e frequência das descontinuidades presentes no maciço rochoso.

A diminuição e/ou o aumento da velocidade das ondas primárias e secundárias são influenciadas por diversos fatores. **Ellis e Singer (2007)**, **Altindag (2012)** e **Sygala et al., (2013)** mostram que a redução e/ou aumento da velocidade são: litologia, textura, densidade da rocha, porosidade, anisotropia, saturação, tensão, temperatura, intemperismo, mineralogia do cimento, poros, descontinuidade e as propriedades das juntas, em **Winkler e Murphy (1995)**, **Kiliç (2006)** e **Quadar (2014)** demonstram que a estrutura, angularidade e seleção dos grãos impactam as medidas acústicas e elásticas. **Barton (2007)** complementam que as propriedades das descontinuidades como a resistência à compressão da parede da junta (JCS), rugosidade da parede (JRC), alteração, persistência ou continuidade e o tamanho da descontinuidade.

Uma importante informação é que as ondas cisalhantes são muito mais sensíveis a detecção de fraturas do que as ondas compressivas (**SERRA, 1986**). Nos perfis sônicos a detecção das zonas fraturadas é feita observando a diminuição da amplitude e velocidade, nas ondas primárias a diminuição é muito menor do que as ondas cisalhantes. Em algumas situações erros de detecção são observados nos perfis sônicos, esses erros podem ser originados pelas

fraturas e zonas muito fraturadas, ainda a redução pode ser reflexo dos parâmetros operacionais no momento da execução do ensaio (SERRA, 1986; TITTMAN, 1986).

Essa diminuição dos parâmetros físicos da onda (amplitude, velocidade e frequência) acontece com independente se as fraturas são horizontais ou alto ângulo induzidas ou naturais, que incluem as fraturas naturais extensionais inclinadas de médio ângulo, fraturas cisalhantes de alto ângulo e as fraturas naturais cisalhantes de ângulo intermediário (KULANDER, 1986; LORENZ e COOPER, 2018; SERRA, 2008). As fraturas verticais podem se tornar indetectáveis (MORRIS *et al.*,1964), o que pode visto em maiores detalhes na figura 9.

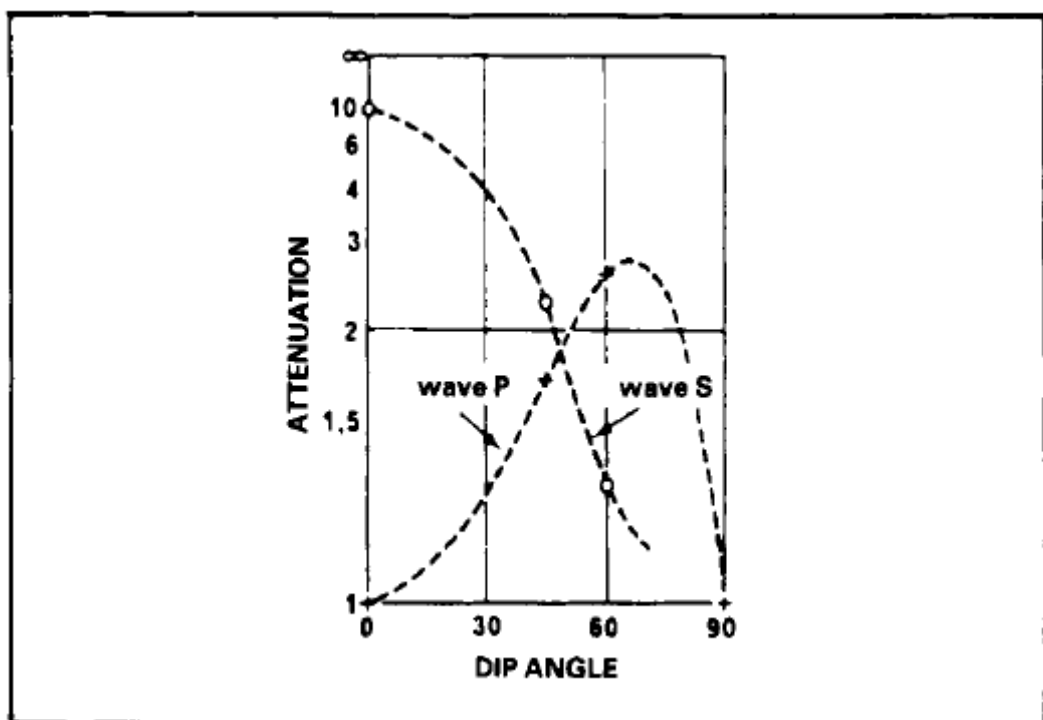


Figura 9. Redução da amplitude das ondas P e S em função do mergulho da descontinuidade.

Fonte: Morris *et al.*, 1964.

As ondas quando são emitidas sofrem diversos fenômenos físicos como reflexão, refração e transferência de energia, então podemos afirmar que a velocidade e amplitude da onda é reduzida com a presença de fraturas (ELLIS e SINGER, 2007; SERRA, 1986) e os principais fatores a serem mensurados são o ângulo de mergulho e o tamanho da fratura tornando elementos cruciais e suas medidas devem ter cuidado, uma das técnicas confiáveis é a perfilagem Geofísica orientada com o *Óptico Televiver*.

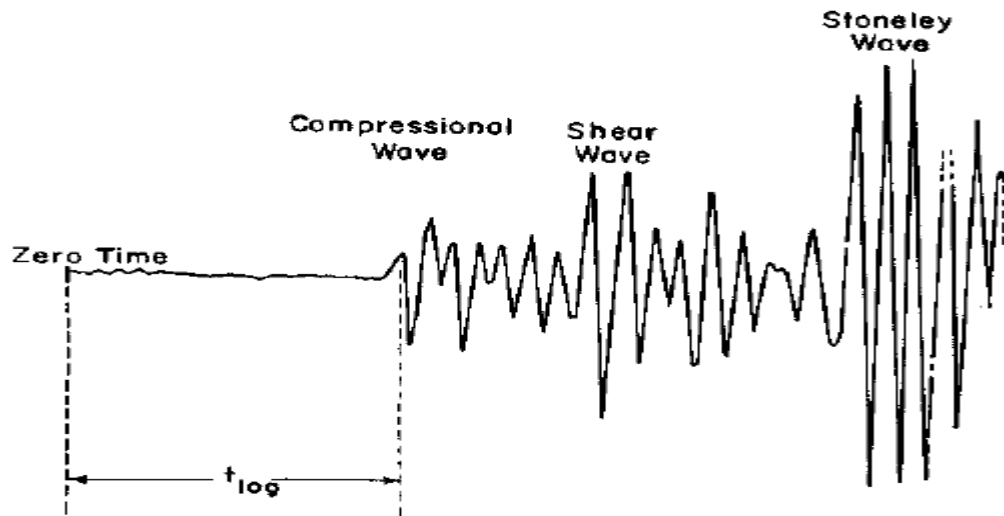


Figura 10. Identificação das ondas e seus respectivos tempos de recepção.

Fonte: Bassioni, 1994.

Na figura 10 é possível perceber que a velocidade da onda compressiva é maior do que as outras ondas. O osciloscópio fornece o tempo em que a onda é recepcionada, a maneira que determina o tempo é manual, o que propicia um erro na sua estimativa. A determinação da velocidade das ondas tem a mesma fórmula de Física Básica estudada no Ensino Médio e durante a disciplina de Física I na Graduação em Engenharia, equação 01.

$$v_{m\acute{e}dia} = \frac{\Delta d}{\Delta t} \dots\dots\dots (01)$$

Sendo:

$v_{m\acute{e}dia}$ é a velocidade média (m/s)

Δd corresponde ao tamanho do corpo de prova (cm)

Δt é a variação de tempo (μ s).

Na tabela 1 é possível observar a velocidade e o tempo de trânsito da onda compressiva em diferentes litologias, esses valores podem variar bruscamente em uma mesma litologia, como já mencionamos inúmeros fatores alteram as propriedades, o mesmo acontece com as rochas, formadas em diferentes ambientes geológicos.

Tabela 1. Velocidade da Onda Compressiva e Tempo de trânsito de algumas rochas e líquidos.

Material	Velocidade Compressiva (Km/s)	Intervalo de Trânsito compressivo (µs/m)
Calcários	7.0	140
Arenitos	5.6-5.9	170-180
Dolomita	7.1-7.7	130-140
Anidrita	6.3	160
Siltito	1.8-4.0	250-550
Argila	1.8-2.4	410-550
Sal	4.5	220
Aluvião	3.0-5.9	170-330
Água fresca	1.5-1.6	610-670
Água Salgada	1.8	550
Petróleo	1.3	770

Fonte: **TITTMAN, 1986.**

3.3.RESUMO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS

Quando aplicamos uma força em um corpo sólido resultará em mudança da forma e em mudança no seu volume (Figura 10.a). A relação entre a força aplicada e uma unidade de área é chamada de pressão ou tensão. **Ellis e Singer (2007)** afirmam que a tensão à tração quando aplicada na face de um corpo produz uma elongação axial do corpo. Essa elongação axial é proporcional a força aplicada essa proporção é chamada de Lei de *Hooke*.

O contrário é visto quando é aplicado uma força compressiva paralela a face do material (Figura 10.b). Ocorre encurtamento (Δl) do comprimento e o aumento do raio (Δd) do corpo de prova. A razão entre o encurtamento e o comprimento é a elongação é “ ϵ ”, que pode ser ϵ_t e ϵ_L , que são as elongações transversais e longitudinal, respectivamente. Determinados pela equação 02 e 03.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots . (02)$$

$$\epsilon_L = \frac{\Delta d}{d} \dots\dots\dots (03)$$

Sendo:

ΔL , o encurtamento do corpo de prova quando aplicada uma força;

L é a comprimento do corpo de prova;

Δd é o aumento do diâmetro do corpo de prova quando aplicada uma força;

d é o diâmetro inicial do corpo de prova.

Para se determinar o módulo de elasticidade (E), é necessário conhecer a tensão aplicada no corpo de prova e a elongação longitudinal durante o ensaio, a **ASTM E 111**, é norma para a determinação do módulo de Elasticidade, que é basicamente a relação contida na equação 04.

Para a maioria das rochas, o módulo de elasticidade varia de 10^{10} a 10^{11} Pa (**BASSIONI, 1994**).

$$E = \frac{F \Delta L}{A L} = \sigma \varepsilon \quad \dots\dots \quad (04)$$

Sendo:

σ é a tensão aplicada (MPa);

ε é a elongação transversal (adimensional).

O Módulo de Massa (K) é descrito pelo raio entre a tensão cisalhante para uma tensão quando submetido a uma variação de volume (Equação 05). O corpo é comprimido uniformemente com uma variação de volume, o módulo de massa é o mesmo que dizer compressibilidade (**BASSIONI, 1994**).

$$k = \frac{\sigma}{\frac{\Delta v}{v}} \quad (05)$$

Sendo:

σ é a tensão aplicada (MPa);

$\frac{\Delta v}{v}$ é a variação volumétrica, podendo ser expressa em função da variação de temperatura e do coeficiente de dilatação volumétrica, de grande importância em sólidos submetidos a alta temperatura ou congelamento.

O Módulo de Cisalhante (G) também chamado de Módulo de torção (Figura 10.c) e para a maioria das rochas a relação é $\frac{1}{3} < G < \frac{1}{2}$ maior que o módulo de elasticidade (**BASSIONI, 1994**), a sua determinação é feita pela equação 6.

$$G = \tau \operatorname{tg}(\theta) \quad (06)$$

Sendo:

τ é a tensão cisalhante aplicada (MPa);

$tg(\theta)$ é a deformação específica cisalhante (adimensional).

Razão de Poisson (ν) quando aplicado em rocha varia de 0,05 a 0,40, em rochas sedimentares a razão gira em torno de 0,25 (**BASSIONI, 1994**). A razão de Poisson é determinada pela equação 07.

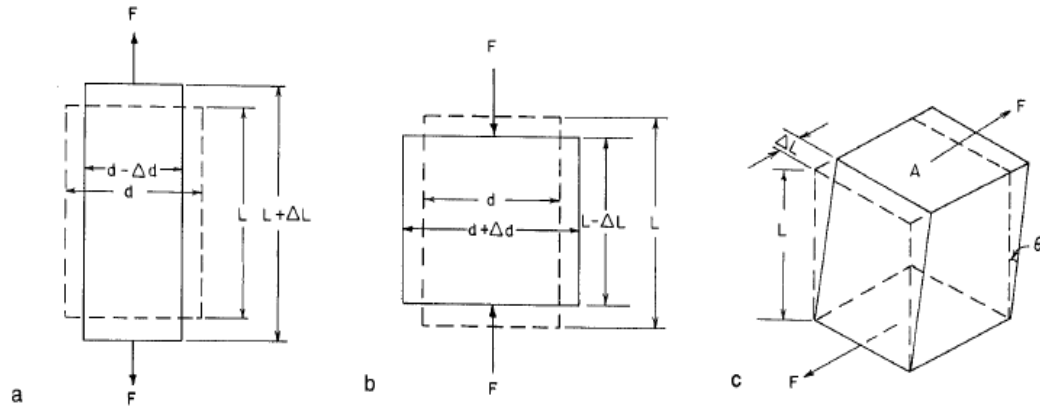
$$\nu = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad \dots \quad (07)$$

Sendo:

$\frac{\Delta d}{d}$ é a elongação longitudinal (adimensional);

$\frac{\Delta L}{L}$ é a elongação axial ou transversal (adimensional).

Figura 11. (a) Aplicação de uma força tracional, (b) Aplicação de uma força de compressão e (c) Aplicação de uma força cisalhante é importante observar a medida de θ .



Fonte: **Bassioni, 1994**.

Podem existir relações entre os módulos elásticos dinâmicos e as ondas acústicas obtidas durante o campo ou em laboratório (Tabela 2). Além disso é possível obter correlações entre as propriedades elásticas dinâmicas e estáticas, abaixo apresenta um quadro resumo das propriedades elásticas dinâmicas.

Tabela 2. Regressão das propriedades Elásticas Dinâmicas com a densidade e as velocidades das ondas P e S.

<i>Propriedade Elástica Dinâmica</i>	ρ, V_p e V_s
Módulo Cisalhante (Shear Modulus) - G	ρV_s^2
Módulo de Massa (Bulk Modulus) - K	$\rho (V_c^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$
Módulo de Elasticidade (Young Modulus) - E	$\frac{\rho V_s^2 (3V_c^2 - 4V_s^2)}{V_c^2 - V_s^2}$
Razão de Poisson (Poisson Ratio) - ν	$\frac{V_c^2 - 2 V_s^2}{2 (V_c^2 - V_s^2)}$

Fonte: Ellis e Singer, 2007.

Essas 4 (quatro) propriedades relacionam-se entre si. É possível determinar o módulo Cisalhante em função do módulo de elasticidade e da razão de Poisson, uma outra dependência é o módulo de Massa em função do módulo de elasticidade e a razão de Poisson, conforme as equações 08 e 09.

$$G_{dinâmico} = \frac{E_{dinâmico}}{2(1+\mu_{dinâmico})} \dots\dots\dots (08)$$

$$k_{dinâmico} = \frac{E_{dinâmico}}{3(1-2 \times \mu_{dinâmico})} \dots\dots\dots ..(09)$$

3.4.EFEITO DA TEMPERATURA

Como mencionado anteriormente, a temperatura é um dos fatores responsáveis pelas modificações das características mecânicas e acústicas das rochas (SYGALA *et al.*, 2013). O homem desde dos tempos antigos possuíam o interesse, pelo menos empírico naquele momento do enfraquecimento da rocha quando submetido a temperatura, podemos mencionar que nas primeiras escavações subterrâneas os mineiros empilhavam pilhas de madeira para serem queimadas nas frentes de desenvolvimento (HERRMAN, 1982).

O primeiro registro do interesse do efeito da temperatura em Rocha foi feita com a queima de Caolim. A queima emitiu luz durante a sua queima (DIMITRIYEV *et al.*, 1969 *apud el.*, SYGALA *et al.*, 2013) mostrando uma característica fluorescente com a queima. As pesquisas relacionadas ao comportamento da rocha em temperatura se intensificam continuamente e espalham-se nos diferentes continentes com um único objetivo de encontrar alternativas com fatores econômicos, sociais, de segurança, ambientais e que sejam aceitos pelos órgãos regulamentadores (STACEY, 2010).

Os projetos relacionados ao comportamento mecânico da rocha com a temperatura são inúmeros, em destaque: os projetos de exploração geotérmicos, disposição dos rejeitos nucleares (TANTAN *et al.*, 2016), exploração de minas profundas, gaseificação do carvão do subsolo, recuperação das minas abandonadas, camadas finas com pouco retorno financeiro ou dificuldades operacionais e de segurança, teor elevado de compostos sulfurados, alto teor de cinzas, depósitos sobre infraestrutura permanente como estradas e rios (LUO e WANG, 2011), recuperação avançada do petróleo (LÜ *et al.*, 2016), construções que foram impactadas pela temperatura ou explosão, desastre geológico e formação estrutural e geológica (SUN *et al.*, 2016), localização de terremotos e de reservatório, determinação das propriedades físicas, delimitação do reservatório e delimitação entre óleo e gás (ITO *et al.*, 1979).

As operações que envolvem alta temperatura afetam o tamanho das fraturas, sejam elas naturais ou induzidas, inclusive pode fechá-las ocasionada pelos diferentes coeficientes de expansibilidade anisotrópica presente na rocha (LUO e WANG, 2011). Além disso, é esperado que a umidade e a água estrutural natural contida na rocha seja perdida durante a tensão térmica.

Nas últimas décadas a investigação do comportamento mecânico e das propriedades físicas rochas com a temperatura intensificaram em busca de respostas e grande parte dos pesquisadores submeterão diferentes litologias a condição extrema que incluem o aquecimento, resfriamento e diferentes pressões confinantes (YANG *et al.*, 2017). Os principais fatores responsáveis pela mudança das propriedades elásticas das rochas quando submetidos a temperatura são: Evaporação térmica que é torno de 400 °C e a formação das microfaturas (SYGALA *et al.*, 2013) essas mudanças que ocorrem na rocha são irreversíveis (LÜ *et al.*, 2017)

Tantan *et al.* (2016), Ding *et al.* (2016) e Yang *et al.* (2017) investigaram a mudança das características mecânicas com a determinação da resistência à compressão e resistência à tração em diferentes temperaturas. As temperaturas dos ensaios variam de 20°C à 800°C.

Ito *et al.* (1979), Nur (1989), Winker e Murphy III (1995), Frazen *et al.* (2012), Yin *et al.* (2016) e Sun *et al.* (2017) estudaram a redução e o aumento da velocidade de propagação da onda P em arenitos. Os resultados mostraram a redução da velocidade com a temperatura é uma regressão exponencial, outros poucos autores determinaram a onda S.

3.4.1. Velocidade das ondas ultrassônicas em temperatura

Em muitas situações a onda S é negligenciada devido à dificuldade de identificá-la (SERRA, 1986). Podemos mencionar os trabalhos de Nur (1989), Winker e Murphy III (1995), Frazen *et al.* (2012), Lebedev *et al.* (2014), Ding e Song (2016), Yin *et al.* (2016) que estudaram as rochas carboníferas. Lü *et al.* (2017), Sun *et al.* (2017) e Kiliç (2017) estudaram os calcários. Yang *et al.* (2017) estudou arenitos e determinaram a onda S, os resultados de sua pesquisa serviram de comparação para os resultados obtidos neste trabalho.

É importante mencionar que a temperatura no eixo da abscissa é somente simbólica, já que as amostras não sofreram o tratamento térmico e corresponde a uma média dos resultados obtidos nas amostras que foram ensaiadas nas temperaturas respectivas, o que facilita as diferenças entre os resultados obtidos antes e depois do tratamento térmico (Figura 12).

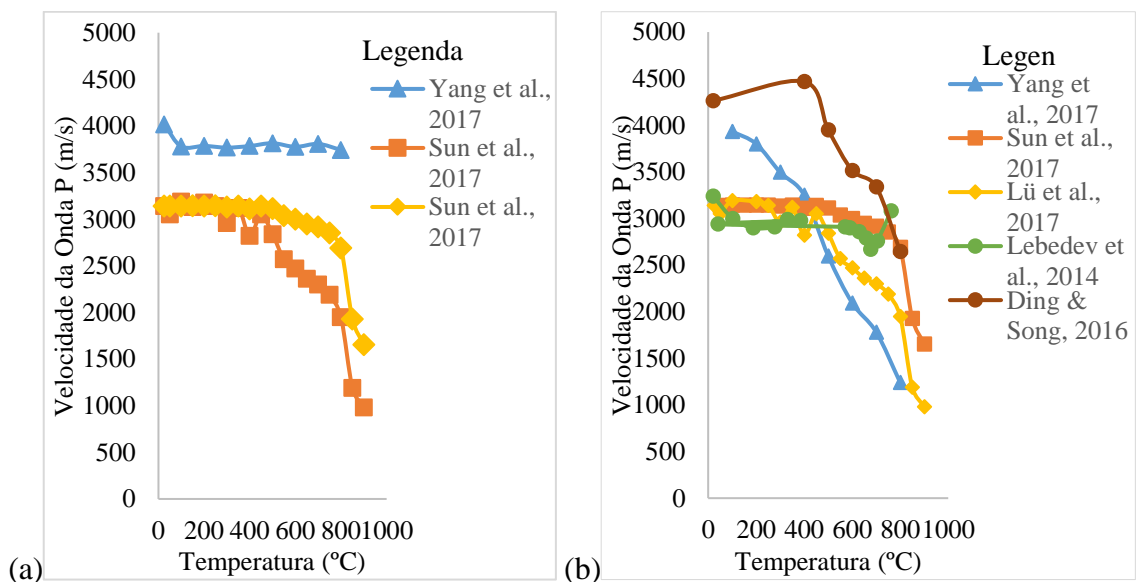


Figura 12. Velocidade da onda P (a) antes e (b) depois submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento.

Fonte: Autoria Própria.

Como mencionado anteriormente, poucos autores tentaram determinar a velocidade da onda S. O maior destaque é feito em Winker e Murphy III (1995) e Yang *et al.* (2017). Em Winker e Murphy III (1995) a redução da velocidade da onda S é uma regressão linear decrescente, sem sinais de subida. Ao contrário do que visto em Yan *et al.* (2017), nas temperaturas de 25°C a 300°C ocorre o aumento das velocidades enquanto que nas temperaturas superiores a 300°C houveram somente diminuição das velocidades da onda S (Figura 13).

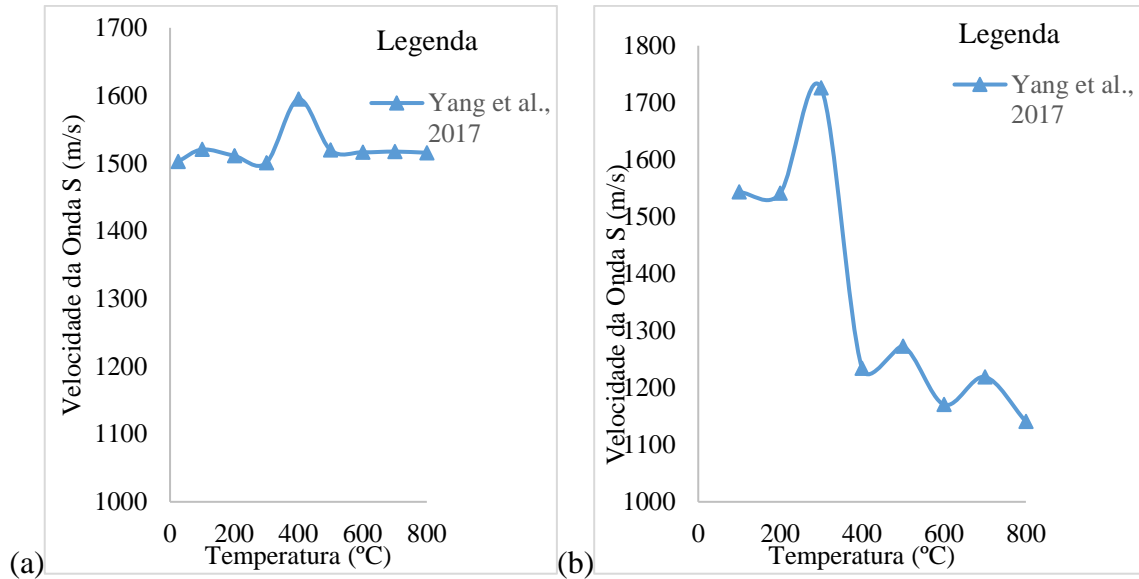


Figura 13. Velocidade da onda S (a) antes e (b) depois de serem submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento

Fonte: **Yan et al., 2017.**

Com a determinação das velocidades das ondas P e S dos corpos de prova, umas das informações possíveis é mostrar uma interrelação de dependência entre as amostras. Em **Pickett (1963)**, ele percebeu que diferentes litologias entre elas: dolomitos, arenitos, arenitos com matriz de calcário e calcários apresentam uma regressão linear decrescente em função somente das velocidades das ondas P e S ou ainda com diferentes tempos de trânsito, independente da temperatura (Figura 14).

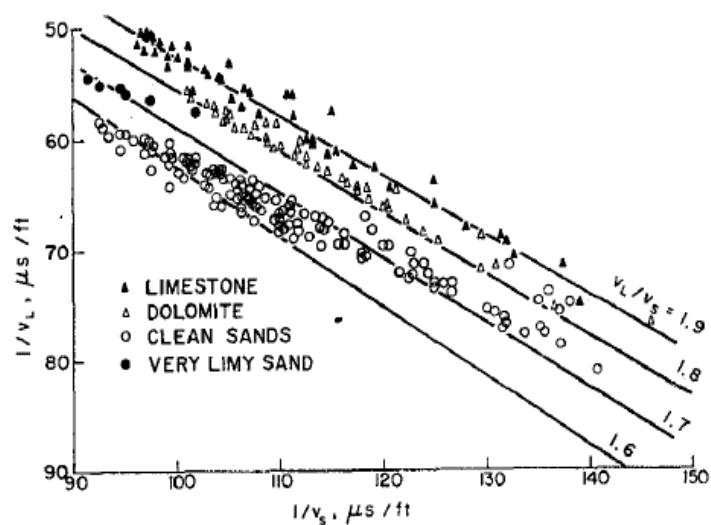


Figura 14. Relação entre os tempos de trânsito da Onda P e S em diferentes rochas, a mesma relação é obtida entre as velocidades.

Fonte: **Pickett, 1963.**

É importante mencionar que em **Sjögren (1979)**, **King & Marsden (2002)**, **Castagna et al. (1985)**, **Ribacci (1988) apud el. Barton (2007)**, **Saito (1981) apud el. Barton (2007)**, apresentaram um comportamento contrário, ou seja, a dependência linear entre as velocidades das ondas P e S é crescente entre as velocidades das ondas P e S (Figura 15). A mesma tentativa foi feita para antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento.

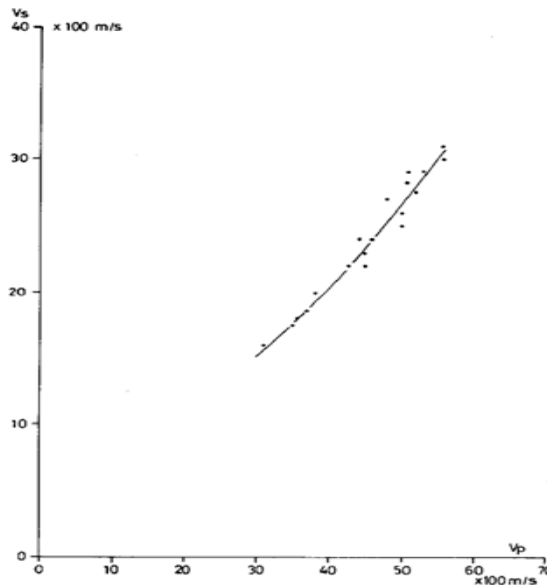


Figura 15. Relação V_p e V_s em Arenitos.

Fonte: **Sjögren, 1979.**

3.4.2. Resistência à compressão com a temperatura

A resistência à compressão com os ensaios uniaxial é o parâmetro mais usado em projetos que envolve maciço rochoso (**VILLAESCUSA, 2014**), o que inclui o parâmetro qualitativo e quantitativo como entrada de entrada na Classificação Geomecânica, *Rock Mass Rating* e nos modelos numéricos. A determinação da resistência à compressão é a razão entre a força de ruptura ou máxima e a área da seção transversal do corpo de provas de prova cilíndricos (Equação 10). É importante informação é o cuidado na preparação dos corpos de prova para a validação dos ensaios que serão feitos, para a normalização para a preparação das amostras foram utilizadas as normas ASTM D 2938 (*Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimes*) e a ASTM D 4543 (*Standart Practices for Preparing Rock Core Specimes and Determining Dimensional and Shape Tolerances*)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (10)$$

Sendo:

F:força de ruptura normalmente a sua unidade de medida é o Newtons (N);

A, é a área da face do corpo de prova.

Para a determinação do módulo de Elasticidade foi utilizado a norma **ASTM E 111**. O módulo de elasticidade é a razão entre a pressão, medida em Pascal (Pa) e o encurtamento do corpo de prova em proporções definidas na norma, essa unidade é adimensional. O gráfico *Pressão – ε* é chamado de curva característica do ensaio.

A estimativa da resistência à compressão é feita por meio das medidas sônicas em forma de uma equação de regressão e as medidas além de precisas devem ser tomada com bastante cuidado já que diversos fatores geológicos e operacionais durante o ensaio interferem na sua determinação (**BARTON, 2007**). Nas figuras 16 e 17 é possível observar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade obtidos em laboratório. Podemos observar que uma mesma unidade litológica as suas propriedades variam bruscamente entre os autores consultados.

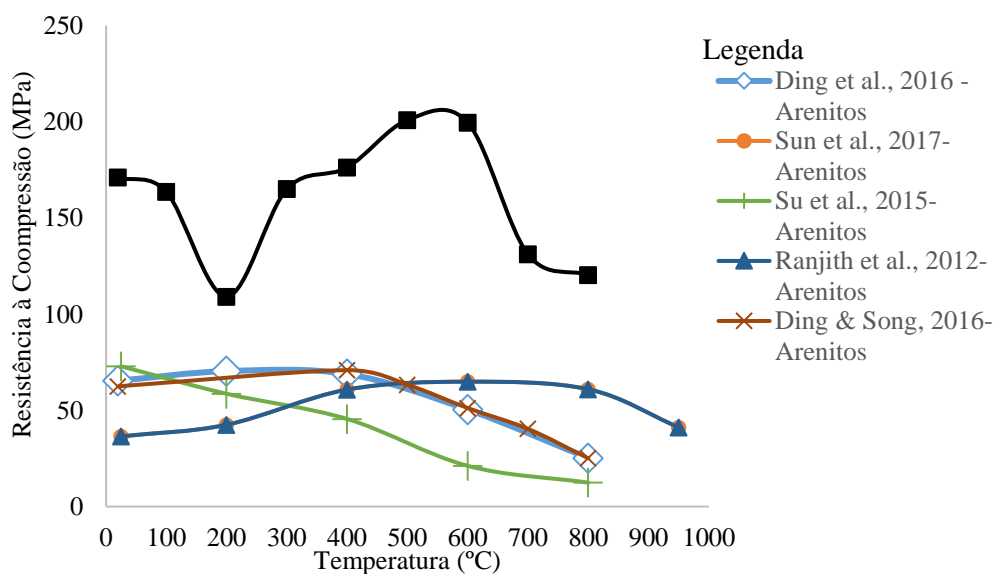


Figura 16. Resistência a Compressão Uniaxial com a Temperatura em Arenitos.

Fonte: Autoria Própria.

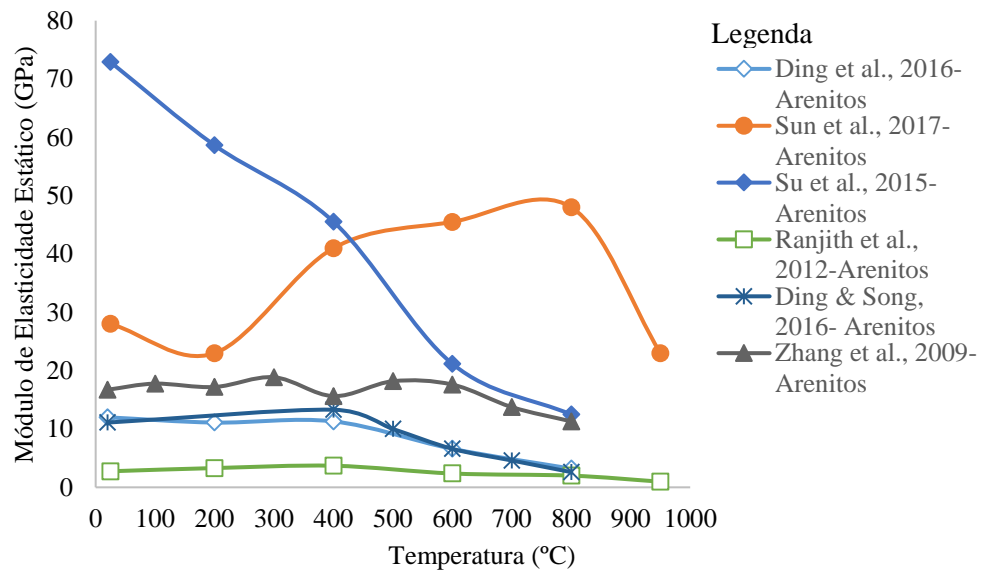


Figura 17. Módulo de Elasticidade Estático obtidos nos Ensaios de Resistência Uniaxial variando a Temperatura em Arenitos.

Fonte: Autoria Própria.

3.4.3. Resistência à compressão em diferentes pressões confinantes com a temperatura

Os primeiros ensaios para a determinação da resistência à compressão com os corpos de prova submetidos a pressão confinante foram executados somente em 1960 em mármore (VILLAESCUSA, 2014). Com os resultados dos ensaios Triaxiais é possível observar o incremento da resistência à compressão com o aumento da pressão confinante, o ângulo de atrito e coesão da rocha com os critérios de ruptura, como o critério de Ruptura de *Mohr* ou outro tipo de equação de ruptura. A norma para os ensaios triaxiais é a **ASTM D 2664** (*Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undeained Rock Core Specimens without Pore Pressure Measurements*).

Yu et al. (2015) estudou o comportamento de rochas com descontinuidades preenchidas (*gouge*) em diferentes ângulos de mergulhos. Os ensaios foram realizados a 20 MPa de pressão confinante. Os autores mencionam que o comportamento mecânico do maciço rochoso depende da espessura do preenchimento, das propriedades do preenchimento, grau de saturação do preenchimento, tamanho da abertura e do mergulho do preenchimento.

Devemos chamar a atenção das propriedades do mesmo maciço rochoso quando submetido a temperatura, sabemos que é evidenciado a mudança mineralógica, mudança das estruturas dos minerais, mudança das propriedades físicas e mecânicas, algumas dessas propriedades já vimos anteriormente. Isso se torna mais evidenciado em teste em blocos (Figura

18). Podemos chamar a atenção aos experimentos realizados em Washigton descritos em **Hill et al. (1984)** e **Camp (2018)** com o processo de *Underground Coal Gasification*.



Figura 18. Experimento em Grandes Blocos em Centralia. Podemos evidenciar em Branco, a zona afetada da camada de carvão, e em laranja o formato assimétrico da cavidade gerada durante o UGC.

Fonte: Camp, 2018.

Fortin et al. (2006) realizou ensaios triaxiais com diferentes pressões confinante (60 MPa, 80 MPa e 100 MPa) e determinaram as velocidades da onda P e S, o módulo de elasticidade. As velocidades das ondas são significativamente reduzidas pela presença das micro fraturas. As micro fraturas são induzidas com a alta temperatura. A densidade das micro fraturas ocorrem somente na temperatura superior a 1000°C (**Habil et al., 2018**). Diversos autores mencionam os valores das resistências à compressão antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento com diferentes pressões confinantes (Figura 19 e 20).

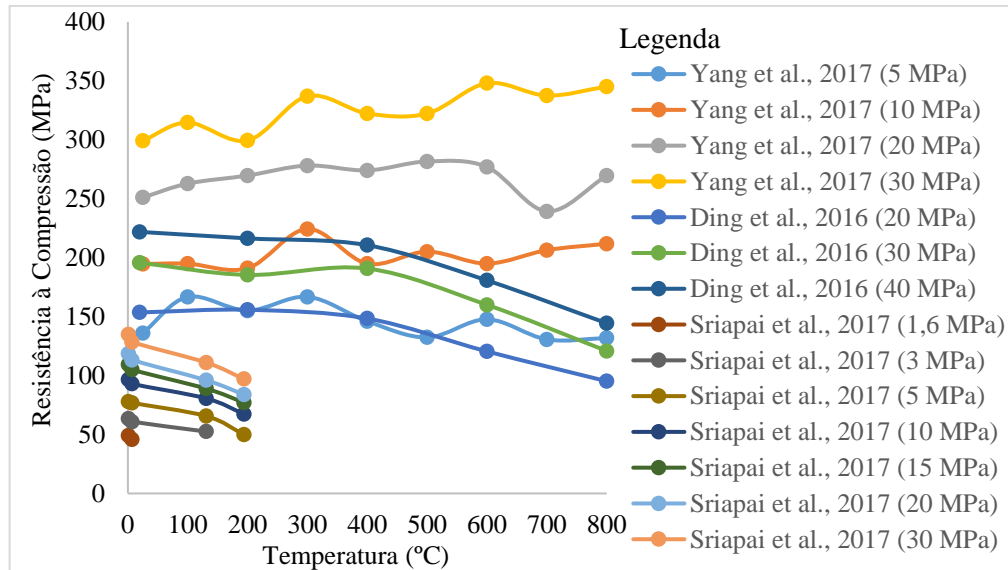


Figura 19. Resistência a Compressão em diferentes pressões Confinantes em Arenitos.

Fonte: Autoria Própria.

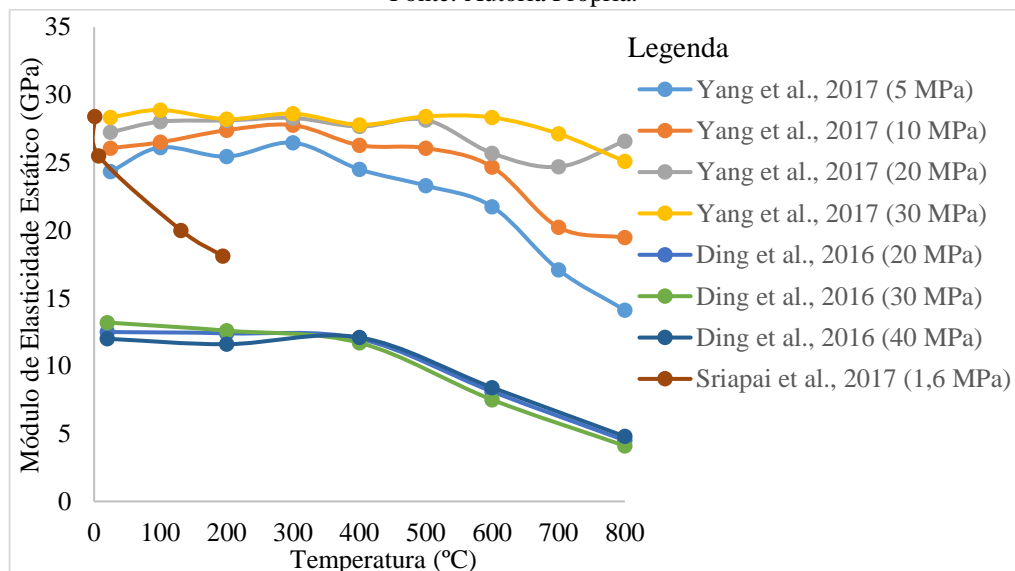


Figura 20. Módulo de Elasticidade Estático em diferentes pressões Confinantes em Arenitos.

Fonte: Autoria Própria.

3.4.4. Resistência à tração com temperatura

A tração é a propriedade relacionado as operações e processos unitário (LÜ *et al.*, 2017) podemos relacioná-las a estabilidade de cavernas, estocagem de material radioativo, energia geotérmica, fraturamento hidráulico e no sequestro do dióxido de carbono (ROY *et al.*, 2016). Para a determinação da resistência a tração são utilizadas diversas metodologias, inclusive as medidas indiretas, como o Ensaio Brasileiro. O ensaio foi disseminado devido a praticidade e os equipamentos são comuns com outros ensaios (SYGALA *et al.*, 2013; LÜ *et al.*, 2017).

Em trabalhos anteriores podemos mencionar **Sriapai et al. (2012)** que utilizaram Halita para os ensaios de tração, mostrando bom coeficiente de determinação e a dependência linear entre a resistência à tração e a temperatura. Em **Lü et al. (2006)** realizaram os ensaios indireta em amostras de arenitos e complementou com a velocidade da onda compressiva depois do tratamento térmico. Esses autores notaram a presença de fases de redução e aumento da velocidade da onda P e S com diferentes temperaturas variando de 22°C a 900°C. A dependência entre a resistência à tração e a velocidade da onda compressiva é polinomial quadrática com grau de determinação de 0,77. Um resumo dos ensaios de resistência à tração é feita na figura 21.

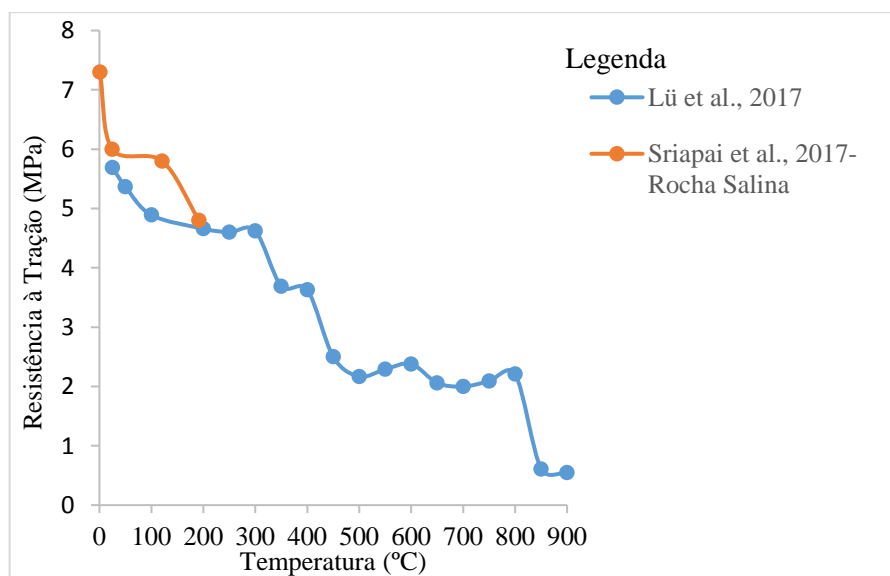
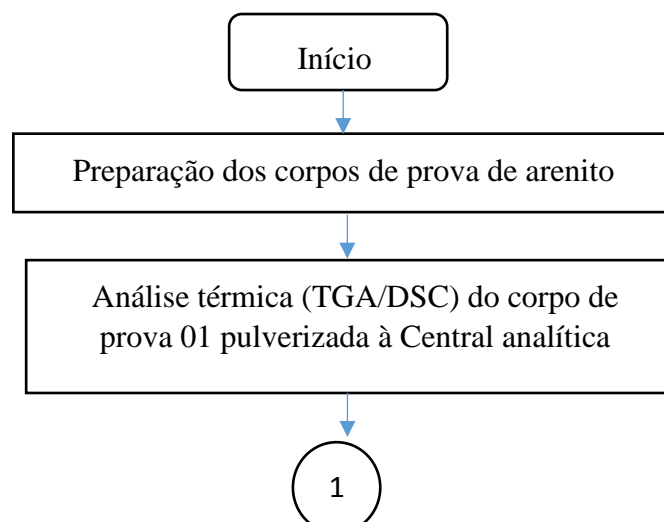


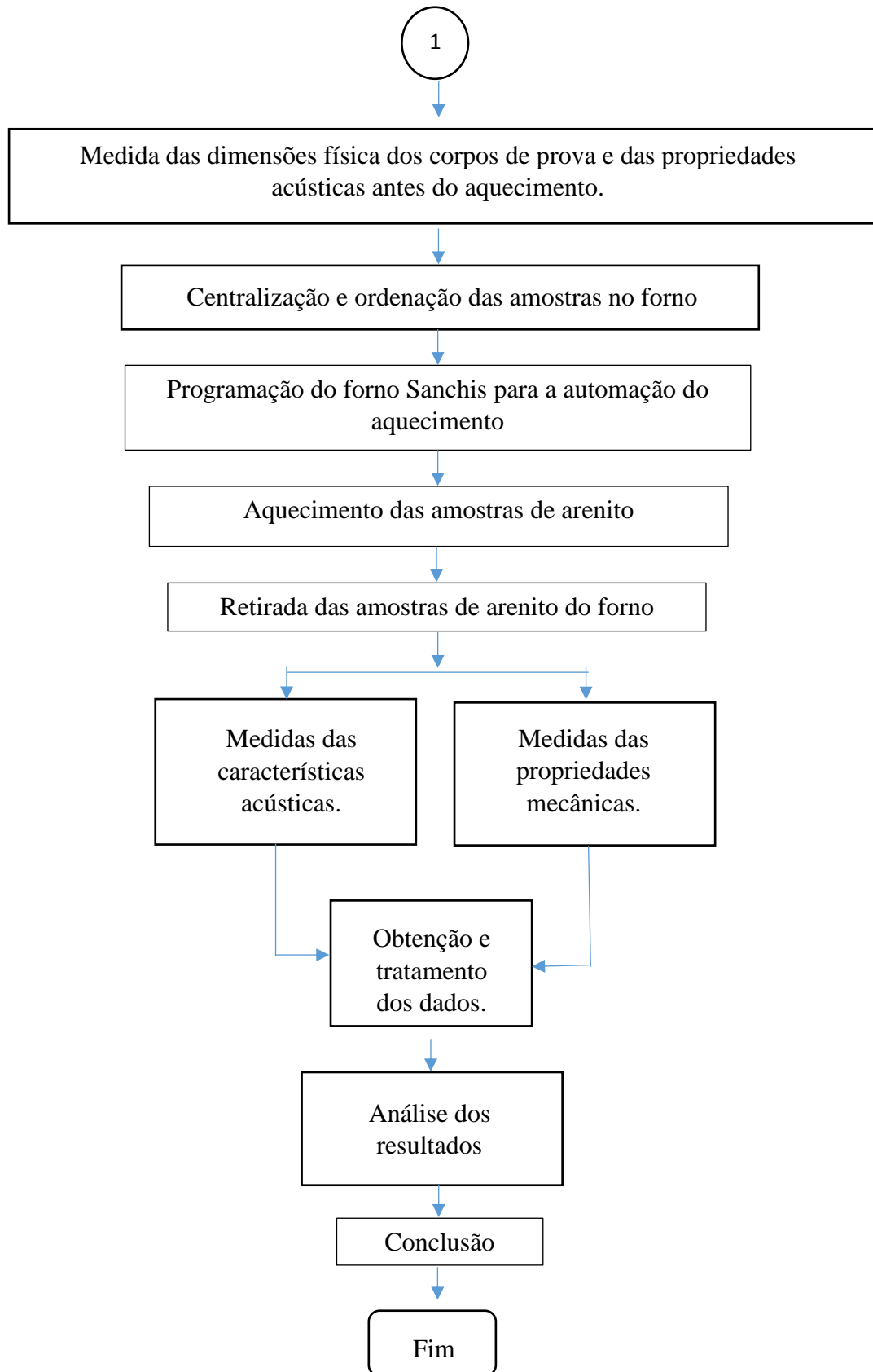
Figura 21. Variação da Resistência a Tração em Arenito e Halita com a Temperatura.

Fonte: Autoria Própria.

4. METODOLOGIA, RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

4.1.FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL





4.2.PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ARENITO

A escolha dos testemunhos para a preparação das amostras é um passo importante. A preferência é para testemunhos sem descontinuidades, o que torna uma tarefa difícil, já que os

testemunhos foram manuseados, transportados sofrendo descontinuidades induzidas, todo esse cuidado é para que a ruptura ocorra somente na rocha intacta (VILLACUESTA, 2014).

Para a dissertação foram confeccionados 35 corpos de prova de arenitos com granulometria fina e grãos bem selecionados. Os testemunhos foram obtidos por sondagem rotativa diamantada *Sidewall Coring* com diâmetro NX (48 milímetros) vindas de uma exploração Mineral na Região Sul do Brasil. Os testemunhos foram submetidos ao corte no Equipamento *Core Trimmer*, modelo DS36 e marca *Control*.

Com a confecção dos corpos de prova, é realizado as medidas do diâmetro, altura e peso mássico de cada corpo de prova. A relação média entre a altura e o diâmetro é de 2,47 entre os corpos de prova, obedecendo a norma ASTM D 4543-01 (*Standart Practice for Preparing Rock Core Specimes and Determining Dimensional and Shape Tolerances*).



Figura 22. Equipamento Core Trimmer para preparação dos corpos de prova.

Fonte: Cortesia do Laboratório de Mecânica de Rocha, 2018.

4.2.1. Pulverização e Análise Térmica da amostra 01

Para os ensaios de Difração de Raio X (DRX), Termogravimetria (TGA) e Análise por Calorimetria Diferencial (DSC) foi designada a primeira amostra do grupo amostral constituído de 36 amostras no total. A metodologia para a amostra 01, segue abaixo:

1º passo: Confeção do corpo de prova 01 com o equipamento core trimmer (Figura 22). A amostra 01 foi encaminhado para o LAPROM (<http://www.ct.ufrgs.br/laprom/index.htm>), Laboratório de Processamento Mineral, Localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2º Passo: No LAPROM a amostra 01 foi submetida a operação de Britagem, com o Britador de Rolos, Modelo *Maqbritt*, com a abertura na posição fechada (APF) máxima. É importante mencionar que nesta etapa, a operação foi repetida duas vezes, o produto da primeira operação unitária é a alimentação da segunda operação, tudo isso para obter um produto ideal para a alimentação da Moagem.

3º passo: O material obtido na britagem foi colocado no Moinho de Recipiente Vibratório, Marca ASTECM, Modelo VIBRO-MILL-1 e Série 2523/09. O produto obtido foi uma amostra pulverizada passante em 200 *mesh*.

4º passo: A amostra foi encaminhada a Central Analítica localizada no Departamento de Engenharia Química da UFRGS (<http://www.eng.ufrgs.br/labs/central-analitica>) onde prosseguiu os ensaios no Difratorômetro de Raio X (DRX), marca Bruker e modelo D2 *Phase*, Análise termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial Exploratória (DSC), marca TA Instruments-Waters e modelo SDT Q600. Os dois últimos ensaios são realizados simultaneamente pelo mesmo equipamento.

5ª passo: Após a análise, foi necessário interpretar os dados gerados no Difratorômetro de Raio X (DRX) com o Software *Match! Phase Identification from Power Diffraction*, Versão 2.

As temperaturas em que foram realizados os ensaios, partiu da interpretação final da Análise Diferencial Exploratória. Com este ensaio é possível identificar mudanças termodinâmicas com implicação na estrutura cristalina, reações de desidratação e perda de voláteis que ocorre na amostra durante o ensaio em tempo real. O ensaio gera duas curvas simultâneas uma delas corresponde a perda de massa da amostra (TGA) e uma curva com a variação (% massa / °C) com a temperatura (DSC), conforme a figura 23.

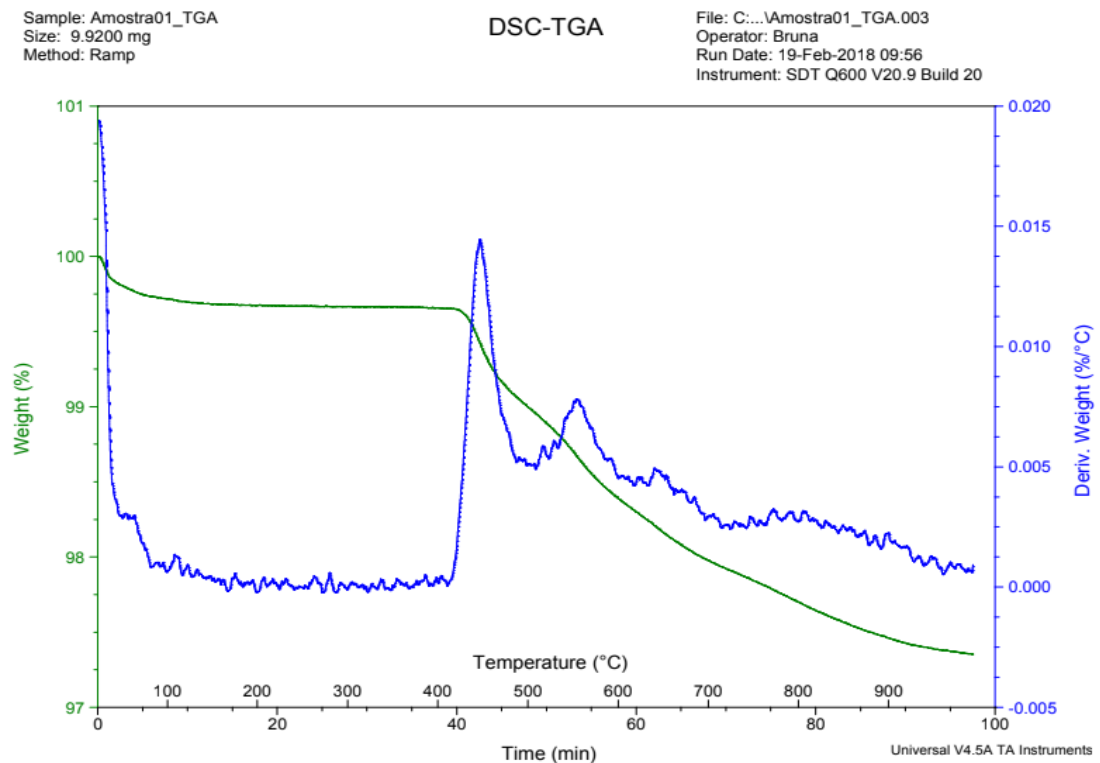


Figura 23. Análise Térmica Diferencial Exploratória (Linha Azul) e Análise Termogravimétrica (Linha Verde).

Fonte: Central Analítica, Departamento de Engenharia Química da UFRGS, 2018.

A maioria das mudanças termodinâmicas foram exotérmicas que representam os picos ascendentes em azul (Gráfico10), no ensaio a amostra 01 libera energia para o ambiente, mostrando um indício da baixa eficiência térmica do processo UCG. As principais transformações na Amostra 01 foram nas temperaturas de 444°C, 580°C e 813 ° C, o que coincide com a transformação termodinâmicas do quartzo (SiO_2). As normas para a interpretações correta dos ensaios térmicos são ASTM D3418, ASTM D4406, ASTM D7582, ASTM E793, ASTM E794 e ASTM E 1131.

A amostra 01 é composta do mineral de quartzo- α (SiO_2) que é a forma estável em baixa pressão e temperatura (Figura 24). O mineral de quartzo é o principal componente mineralógico nas rochas sedimentares (SUN *et al.*, 2016).

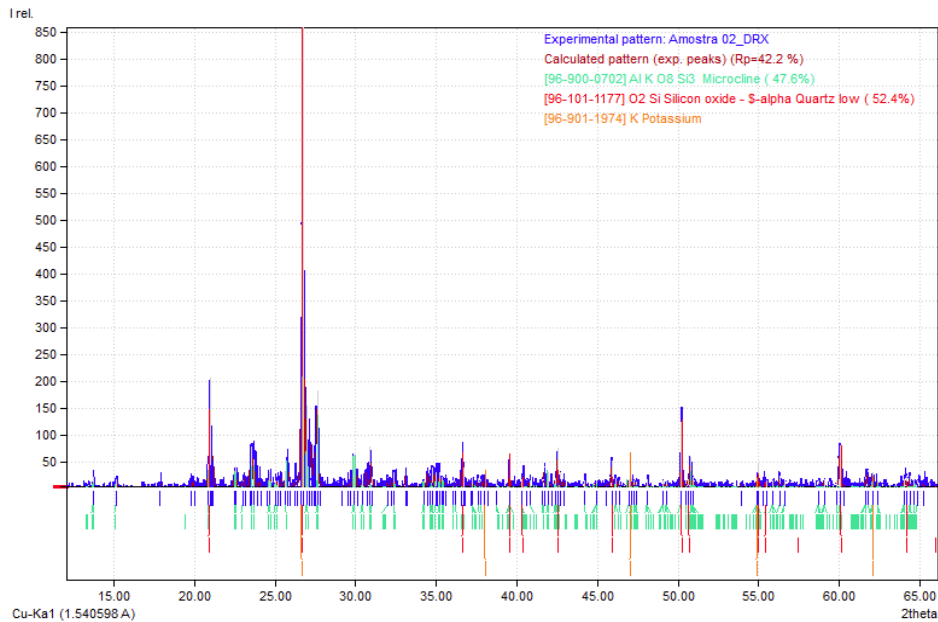


Figura 24. Análise do Difractometria de Raio X na amostra 01.

Fonte: Central Analítica, Departamento de Engenharia Química da UFRGS, 2018.

4.3. TRATAMENTO TÉRMICO DAS AMOSTRAS DE ARENITO

As amostras foram colocadas no Forno *Sanchis*, para o aquecimento das amostras com uma taxa de aquecimento de 5°C/minuto. As amostras foram submetidas a sete diferentes temperaturas, iniciando a 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C e finalizando com 1000°C. Para cada temperatura foram submetidos 5 corpos de prova sendo designado 3 amostras para os ensaios triaxiais com as pressões confinantes de 10 MPa, 17 MPa e 25 MPa e 1 ensaio uniaxial e um ensaio Brasileiro de Resistência à tração (Figura 25).

Com a chegada da temperatura pré-estabelecida para os ensaios o equipamento é desligado automaticamente e as amostras são resfriadas dentro do forno por cerca de 18 horas. Esse tempo é necessário para a segurança do manuseio.

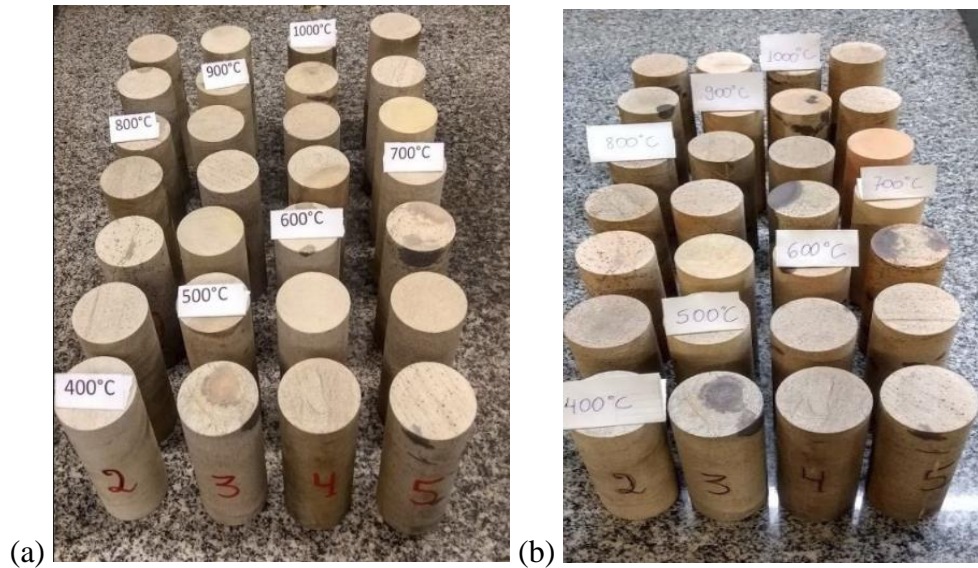


Figura 25. (a) As amostras antes do tratamento térmico e em (b) Amostras após o tratamento térmico.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.4.DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Como já visto, no fluxograma experimental, as propriedades acústicas foram medidas antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento. A propriedade acústica é caracterizada pelo tempo de trânsito (ITT) e da velocidade da onda transmitida e posteriormente recebida pelo transdutor. Para a medida das propriedades acústicas foi utilizado o PUNDIT, modelo PL 200 da Marca *Proceq* (Figura 26).

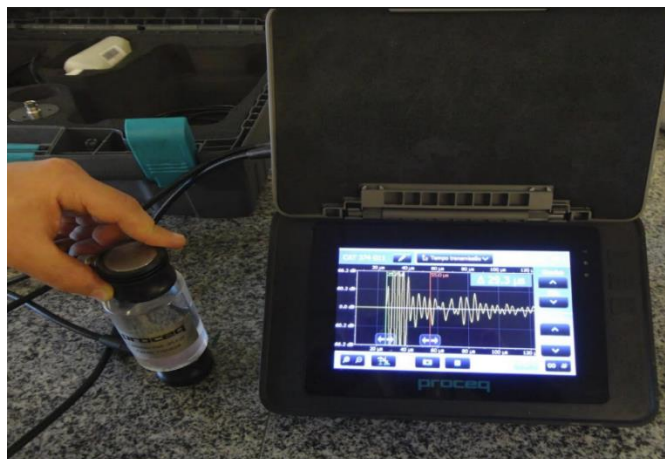


Figura 26. Equipamento PUNDIT, modelo PL 200, Marca Proceq.

Fonte: Cortesia do Laboratório de Mecânica de Rocha, 2018.

O Transdutor e o receptor utilizados são das ondas transversais de incidência normal, marca *Olympus*, modelo V 150 VR, n.º U8403055, frequência 0,25 MHz e Série 1023161 com

25 milímetros de diâmetro. A metodologia para a determinação do tempo de trânsito e/ou a Velocidade da onda sônica das ondas P e S é padronizada pela norma ASTM D 2845 (*Standart Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic constants of Rock*).

4.5.DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO

Antes do tratamento térmico, as propriedades acústicas (tabela 3) foram medidas, no intuito de verificar a diminuição da velocidade da onda P e S antes do ciclo de aquecimento e resfriamento.

Tabela 3. Resumo das propriedades acústicas antes do tratamento térmico.

<i>Litologia</i>	<i>Amostra</i>	Δt_p (s/m) $\times 10^{-4}$	Δt_s (s/m) $\times 10^{-4}$	V_p (m/s)	V_s (m/s)
<i>Arenito</i>	A2	2.84	4.25	3514.4	2347.7
<i>Arenito</i>	A3	3.01	4.06	3316.3	2458.6
<i>Arenito</i>	A4	2.53	3.58	3937.5	2790.2
<i>Arenito</i>	A5	2.61	3.95	3819.9	2530.6
<i>Arenito</i>	A6	2.56	3.77	3899.3	2646.0
<i>Arenito</i>	A7	2.80	3.82	3568.0	2613.9
<i>Arenito</i>	A8	2.89	3.97	3450.4	2512.7
<i>Arenito</i>	A9	2.85	3.89	3499.7	2565.0
<i>Arenito</i>	A10	3.19	4.46	3132.0	2241.4
<i>Arenito</i>	A11	3.28	4.87	3042.6	2049.4
<i>Arenito</i>	A12	3.06	4.35	3260.8	2298.1
<i>Arenito</i>	A13	3.53	4.48	2825.5	2229.6
<i>Arenito</i>	A14	3.51	5.40	2843.2	1850.8
<i>Arenito</i>	A15	3.92	5.27	2547.6	1895.6
<i>Arenito</i>	A16	3.72	5.14	2683.7	1942.6
<i>Arenito</i>	A17	3.42	4.58	2919.2	2180.0
<i>Arenito</i>	A18	4.06	5.34	2461.7	1872.2
<i>Arenito</i>	A19	3.60	5.63	2772.0	1776.0
<i>Arenito</i>	A20	3.98	5.17	2511.0	1933.1
<i>Arenito</i>	A21	3.70	4.82	2701.3	2072.3
<i>Arenito</i>	A22	4.10	5.37	2438.1	1860.7
<i>Arenito</i>	A23	4.02	5.59	2484.5	1786.8
<i>Arenito</i>	A24	4.32	6.11	2310.9	1634.3
<i>Arenito</i>	A25	5.77	7.06	1732.8	1415.7
<i>Arenito</i>	A26	4.68	5.56	2134.6	1797.7
<i>Arenito</i>	A27	5.02	6.53	1990.1	1530.5
<i>Arenito</i>	A28	4.28	5.75	2333.8	1738.8
<i>Arenito</i>	A29	4.00	5.37	2498.4	1861.5

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Conforme descrito no capítulo 3, a relação prevista entre a velocidade da onda S e a velocidade da onda P é dependência linear crescente (Figura 27). O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,9177.

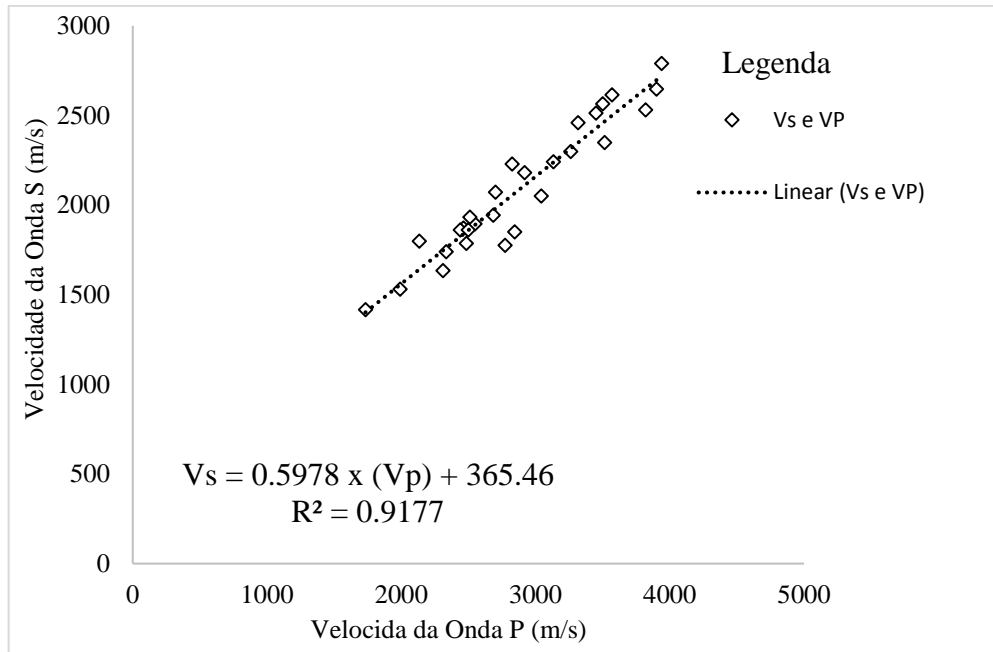


Figura 27. Valores obtidos e regressão linear com coeficiente de determinação antes do tratamento térmico.

Fonte: Autorial Própria, 2018.

4.6.DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DEPOIS DO TRATAMENTO TÉRMICO

Após o tratamento térmico foi observada pouca alteração na cor e densidade aparente em quase toda a totalidade dos corpos de prova. Algumas feições foram observadas como: dilatação anisotrópica entre litologias diferentes, influência da temperatura nas descontinuidades presentes e formação das micro fraturas (Anexo 3).

Tabela 4. Resumo das propriedades acústicas depois do tratamento térmico.

<i>Litologia</i>	<i>Amostra</i>	Δt_p (s/m) $\times 10^{-4}$	Δt_s (s/m) $\times 10^{-4}$	V_p (m/s)	V_s (m/s)
<i>Arenito</i>	A 2	2.83	4.34	3525,2	2300,6
<i>Arenito</i>	A 3	3.03	4.73	3297,1	2112,6
<i>Arenito</i>	A 4	2.53	4.01	3937,5	2493,8
<i>Arenito</i>	A 5	2.67	4.02	3737,2	2488,9
<i>Arenito</i>	A 6	2.58	3.94	3873,9	2532,9
<i>Arenito</i>	A 7	2.77	4.54	3600,0	2202,2
<i>Arenito</i>	A 8	2.88	4.52	3470,7	2212,1

Continuação da tabela 4

Arenito	A 9	2.89	4.45	3469,4	2243,7
Arenito	A 10	3.22	4.62	3098,9	2163,0
Arenito	A 11	3.33	5.22	2996,5	1913,9
Arenito	A 12	3.09	4.65	3225,9	2146,8
Arenito	A 13	3.68	5.42	2715,4	1844,1
Arenito	A 14	3.45	5.40	2892,1	1850,8
Arenito	A 15	4.06	5.37	2458,8	1860,3
Arenito	A 16	3.77	5.36	2647,9	1863,5
Arenito	A 17	3.56	5.72	2808,7	1747,2
Arenito	A 18	4.21	5.65	2370,9	1769,1
Arenito	A 19	3.53	5.45	2831,5	1833,7
Arenito	A 20	4.11	5.85	2432,5	1707,0
Arenito	A 21	3.80	5.60	2625,2	1785,0
Arenito	A 22	4.18	5.60	2389,7	1783,4
Arenito	A 23	4.19	6.05	2390,7	1651,8
Arenito	A 24	4.52	6.20	2211,6	1612,0
Arenito	A 25	5.89	7.95	1695,9	1256,8
Arenito	A 26	4.78	7.08	2089,4	1412,0
Arenito	A 27	5.29	7.15	1888,7	1397,1
Arenito	A 28	4.40	5.77	2269,1	1731,0
Arenito	A 29	5.08	6.83	1965,9	1462,1

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A mesma relação entre as velocidades das ondas P e S (Figura 28) também foi observada uma regressão linear não fugindo do padrão presente na literatura e com alto coeficiente de determinação (R^2) de 0,9472.

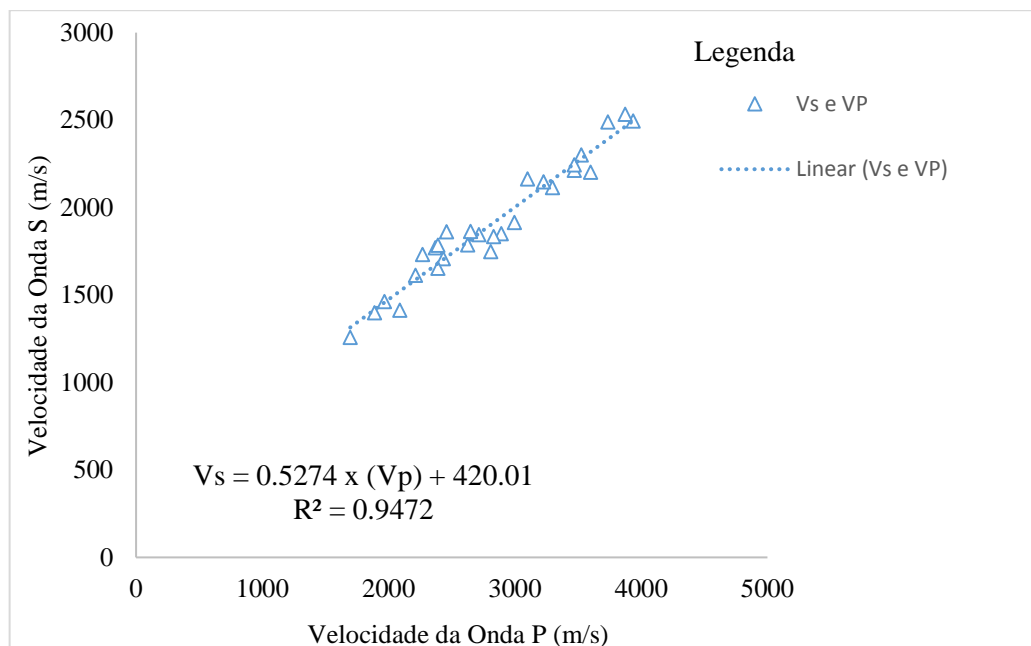


Figura 28. Valores obtidos e regressão linear com coeficiente de determinação depois do tratamento térmico.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Ainda é possível observar o comportamento acústico médio das amostras em cada temperatura (Figura 29) foi observado uma redução das velocidades P e S. Podemos observar que na temperatura de 500°C, a velocidade da onda sofreu uma ampliação sendo que nas outras temperaturas sofreram somente atenuação.

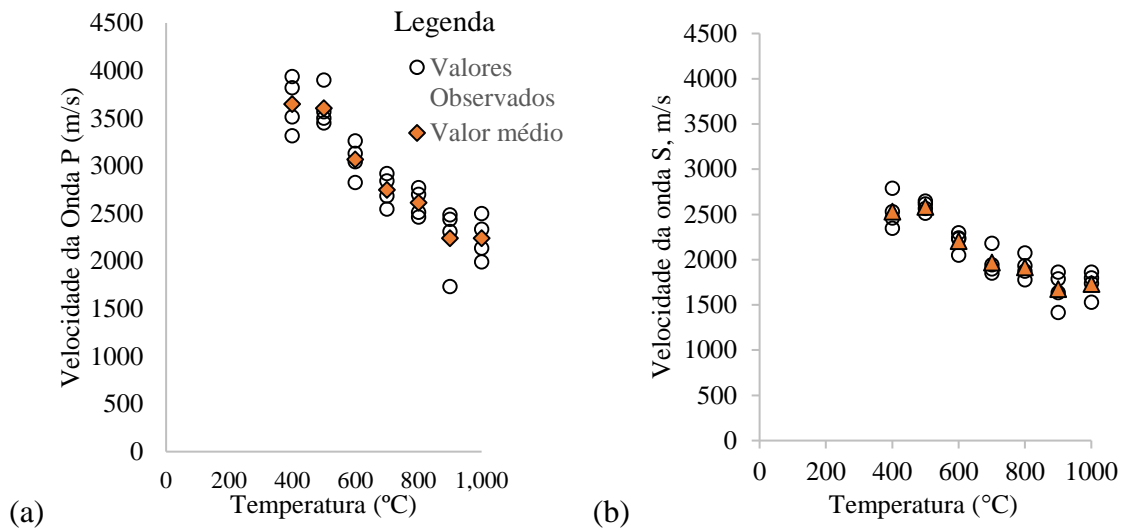


Figura 29. Redução da velocidade das ondas P e S com a temperatura.
Fonte: Autoria Própria, 2018.

As reduções das velocidades das ondas P e S se tornam mais perceptível na figura 30. É importante mencionar que há uma amplificação da velocidade da onda S na temperatura de 500°C, esse valor é considerado um valor anormal, já que em Winker & Murphy III (1995), Kiliç (2006), Frazen *et al.* (2012), Lü *et al.* (2016) e Lü *et al.* (2017) só possuem redução da velocidade das ondas, mas em Zulfahmi *et al.* (2017) houve somente aumento das velocidades da ondas P em arenitos. Em Sun *et al.* (2017) houveram valores não previstos e considerados anormais, como observados nos valores obtidos.

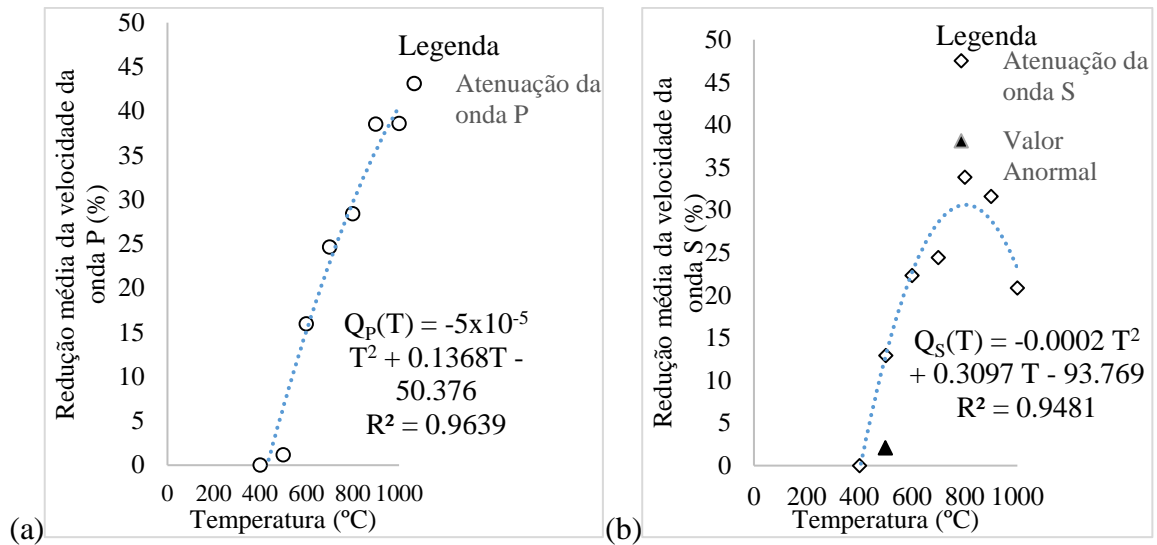


Figura 30. Atenuação (Q) da onda P e S em temperatura.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Como já visto, a amostra 01 é composta basicamente de quartzo alfa. Em Mazzocchi (1964) o mineral de quartzo possui alguns polimorfos (Gráfico 15) e a estrutura cristalina muda com a temperatura. Os principais polimorfos são: quartzo- β , tridimita- α , β e cristalobita- α , β , nessa ordem. O quartzo alfa tem um hábito prismático piramidal e sistema trigonal (GUZZO, 2008) e na temperatura de 573°C muda para o quartzo- β com sistema trigonal para o hexagonal (MAZZOCCHI, 1964). Uma importante transformação termodinâmica é que as reações que ocorrem no quartzo são **instantâneas** e **reversíveis**, ou seja, quando as amostras são resfriamento as mudanças mineralógicas retornam as suas condições originais.

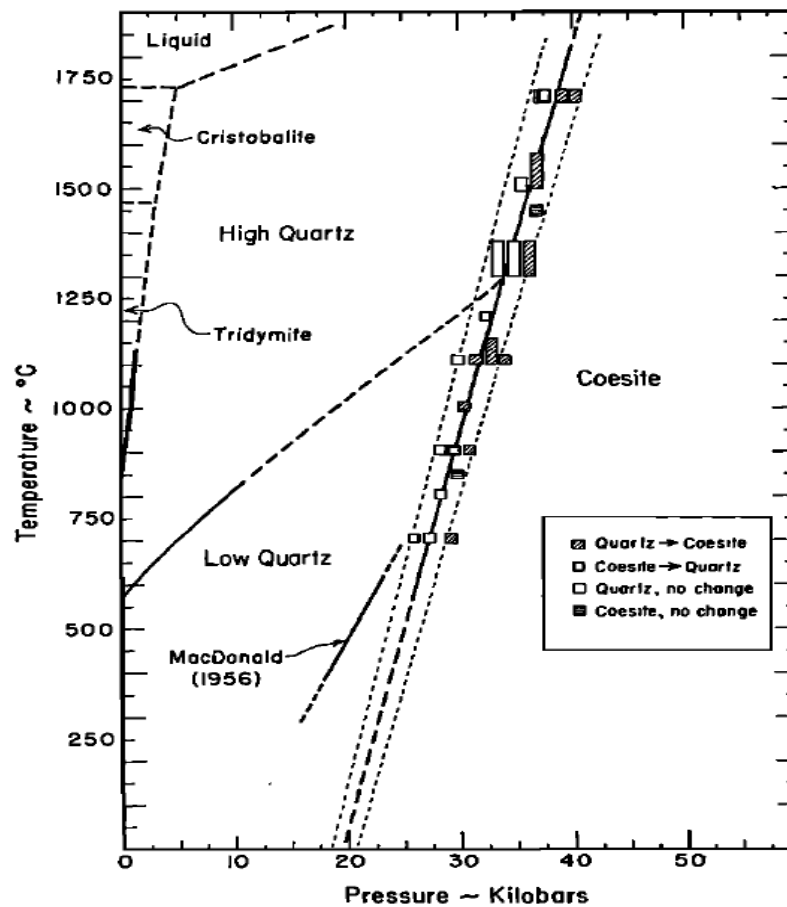


Gráfico 1. Diagrama de Fase do quartzo.
 Fonte: MacDonald, 1956 *apud el.* Boyd & England, 1960.

4.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A ALTA TEMPERATURA

Os ensaios mecânicos foram realizados somente depois que os corpos de prova serem submetidos ao ciclo de aquecimento e resfriamento. Todos os ensaios mecânicos foram realizados com a Prensa hidráulica, série 09005059, categoria C4600/FP, capacidade de carga máxima de 2000 KN, Marca *Control*, a prensa é acompanhada da Célula de Mohr para os ensaios Triaxiais.

Para os ensaios triaxiais foram utilizadas 3 diferentes pressões confiantes de 10 MPa, 17 MPa e 25 MPa. Os ensaios triaxiais foram realizados a uma taxa de carregamento de 1.000 N/s. A padronização dos ensaios foi realizado com a norma ASTM D2664 (*Standart test Method for Triaxial Compressive Strength of Unfrained Rock Core Specimes*) e para os ensaios uniaxiais, a taxa de carregamento é de 500 N/s, conforme norma ASTM D2938 (*Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimes*). Durante os ensaios os deslocamentos axiais foram monitorados e gravados pelo LVDT, código n.º 7011SN

e Marca *Mitutoyo*. Com os ensaios triaxiais é possível obter uma estimativa da resistência uniaxial ($\sigma_3=0$).

Tabela 5. Resultados dos Ensaio Triaxiais

Temperatura (°C)	Regressão Linear	Coefficiente de determinação (R²)
400	$\sigma_1 = 8,8841 (\sigma_3) + 126,38$	0,9383
500	$\sigma_1 = 5,1033 (\sigma_3) + 165,93$	0,9773
600	$\sigma_1 = 5,2586 (\sigma_3) + 151,66$	0,9072
700	$\sigma_1 = 5,7970 (\sigma_3) + 143,26$	0,8525
800	$\sigma_1 = 6,6093 (\sigma_3) + 145,68$	0,9970
900	$\sigma_1 = 0,3414 (\sigma_3) + 245,75$	0,5659
1000	$\sigma_1 = 0,4209 (\sigma_3) + 196,38$	0,7062

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

Tabela 6. Resultados dos Ensaio Uniaxiais.

Amostra	Temperatura (°C)	σ_1 (MPa) Prensa
2	400	116.65
6	500	100.94
10	600	86.01
14	700	129.34
18	800	122.28
22	900	84.13
26	1000	110.90

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

Tabela 7. Resultados dos Ensaios de Tração Indireta

<i>Amostra</i>	<i>Força de Ruptura (KN)</i>	<i>Tempo de Trânsito P</i> (x 10 ⁻⁴ s/m)	<i>Tempo de Trânsito S</i> (x 10 ⁻⁴ s/m)	σ_T (MPa)
2L	9,82	2,6127	5,7810	7,30
9L	12,11	2,6192	4,2431	8,49
13L	4,45	3,7902	5,7633	3,07
16L	4,34	4,1578	6,1834	3,09
18L	9,60	3,7491	6,2352	5,02
23L	9,37	3,5599	5,4554	5,74
27L	6,63	3,6703	6,2575	5,28

Fonte: Autorial Própria, 2018.

Segundo VILLACUESTA (2014) é possível obter uma grande variação da resistência à compressão em rochas da mesma litologia ou com aparência similar, a mesma afirmação é observada em diversos autores mencionados no capítulo 3.

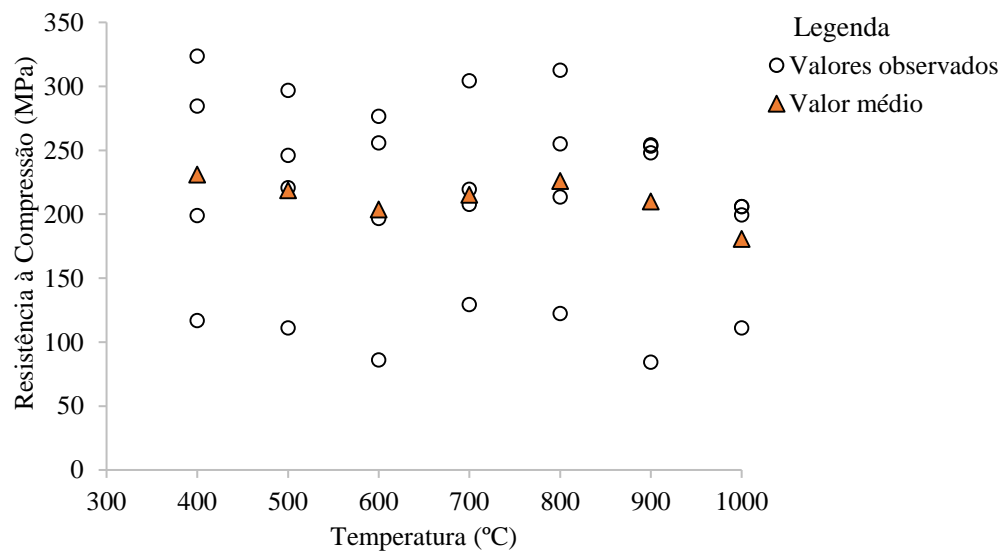


Figura 31. Variação da resistência à compressão com a temperatura.

Fonte: Autorial Própria, 2018.

Diversos artigos científicos estimam que seja possível obter regressões entre a velocidade da onda P e S com diversas outras propriedades físicas, resistência à compressão da rocha (Figura 32), conforme descrito em Rao *et al.* (2015), Lima *et al.* (2016), Azimian *et al.*

(2014), Buttel *et al.* (2014), Chary *et al.* (2006) e Entwisle *et al.* (2005) e o módulo elástico estático (Gráfico 18.b), como descrito em Kujundzić & Grujíc (1966) *apud el.* Barton (2007); Ribacci (1988) *apud el.* Barton (2007). Os ensaios realizados tiveram uma regressão linear com um coeficiente de determinação de 0,7922. Nos ensaios não foram observadas regressões com alto Coeficiente de determinação (R^2) entre a resistência a compressão com a velocidade da onda compressiva (V_p) ainda na literatura é possível observar correlações com a velocidade da onda cisalhante (V_s), sendo este mais comum com as propriedades físicas.

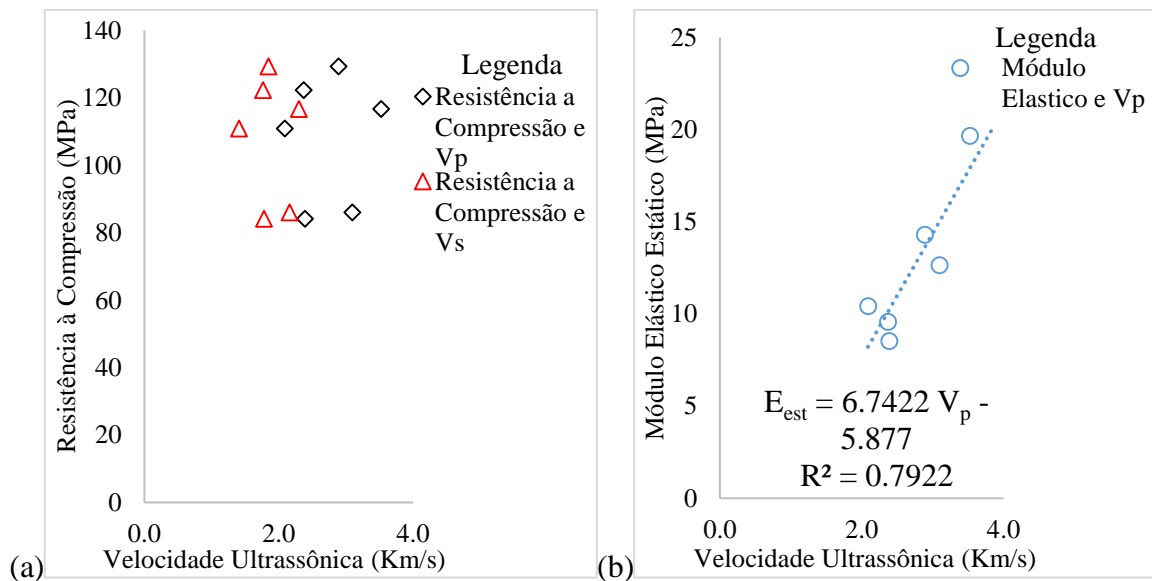


Figura 32. (a) Regressão entre a Resistência à compressão com o V_p e V_s e (b) Módulo de Elasticidade Estático com a V_p .

Fonte: Autoria Própria, 2018.

5. CONCLUSÕES

Os objetivos propostos foram realizados. Foi possível observar uma interdependência linear entre as velocidades das ondas P e S, essa mesma interrelação foram observadas antes e depois do ciclo de aquecimento e resfriamento com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9177 e 0,9472, respectivamente. É esperado que as velocidades das ondas P e S sejam reduzidas com a temperatura. A redução da velocidade é mais evidente na onda P com redução máxima da velocidade de 39% do valor inicial. Na temperatura de 800°C a velocidade da onda S é reduzida continuamente até os 1000°C, passando de 7 % para 3% da velocidade inicial. Os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão apresentaram bons coeficientes de determinação (R^2) máxima de 0,9177 e mínima de 0,5659. A resistência à compressão com os ensaios triaxiais divergem dos resultados obtidos nos ensaios uniaxiais. Os resultados da resistência à tração e os de resistência à compressão apresentaram aumento e redução da

resistência com diferentes temperaturas. A resistência à compressão não apresentou qualquer regressão com as velocidades ultrassônicas, enquanto que o módulo de Elasticidade estático apresentou uma regressão linear crescente com a velocidade da onda P com coeficiente de determinação (R^2) de 0,7922. Indo um pouco além dos resultados obtidos podemos estimar em que ponto ocorreu a área de influência térmica das rochas no UCG a partir das técnicas de perfilagem sônica, o que não possibilita com muita previsão a distância vertical da cavidade precisando de algumas outras informações como modelos numéricos em transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Primeira sugestão: Relacionar o efeito térmico com o alcance em subsuperfície.
- Segunda Sugestão: Propor um método avaliativo para inferir por meio das velocidades das ondas P e S, via poços, o crescimento da direção vertical e da área de influência. A mesma tentativa pode ser feita via simulação usando os princípios de transferência de calor.
- Terceira Sugestão: Estudar com maior detalhe a mudança do comportamento da rocha intacta de rúptil para dúctil com a temperatura.
- Quarta Sugestão: Da continuidade ao trabalho de Komar (1971) com maiores detalhes e anisotropia dos resultados acústicos, o traço nos ensaios à tração, permeabilidades das fraturas naturais e aspectos construtivos para a melhoria do fluxo gasoso no UCG.

7. REFERÊNCIAS

ALTINDAG, R. Correlation between P-Wave velocity and some Mechanical Properties for sedimentary rocks. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**. Vol. 112, p. 229-237. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4543**: Standart Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimes. Pensilvânia, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1131**: Standart test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. Pensilvânia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2664**: Standart Method for Triaxial Compressive Strength of Undeained Rock Core Specimes without Pore Pressure Measurements. Pensilvânia, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2845**: Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. Pensilvânia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2938**: Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. Pensilvânia, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3418**: Standard test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. Pensilvânia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3418**: Standard test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. Pensilvânia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3967**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Pensilvânia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D794**: Standard test Method for Melting and Crystallization Temperatures by thermal Analysis. Pensilvânia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E111**: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus. Pensilvânia, 2017.

ANDRIANOPOULOS, E; KORRE; A; DURUCAN, S. Chemical process Modelling of Underground Coal Gasification and Evaluation of Produced gas quality for end use. Science Direct. **Energy Procedia**, n° 76, p. 444-453.2015.

AZIMIAN, A.; AJALLOEIAN, R.; FATECHI, L. Na empirical correlation of Uniaxial Compressive Strength with P-Wave Velocity and Point Load Strength Index on Marly Rocks using Statistic Method. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2014. Vol.32. p.205-214.

BAKULEV, G.D. **An Economic Analysis of Underground Gasification of Coal**. California: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1962, 96p.

BARTON, N. **Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy**. Londres: Taylor & Francis/ Balkema. 2007. 729 p.

BASSIONI, Z. **Theory, measurement, and Interpretation of Well Logs**. Texas: Society of Petroleum Engineers, vol.4. 1994. 372 p.

BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. **Introduction to Underground Coal Gasification and Combustion**. In: _____. **Underground Coal Gasification and Combustion**. Reino Unido: Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 1-8.

- BOYD, F.R.; ENGLAND, J.L. The Quartzo-Coesita Transition. **Journal of Geophysical Research**, vol. 65, n.º 02. 1960, p. 749-756.
- BURTON, E.; FRIEDMANN, J.; UPADHYE, R. Best Practices in Underground Coal Gasification. Califórnia: Lawrence Livermore National Laboratory, U.S. Department of Energy by the University of Califórnia. 119 p. 2004
- CAMP, D.W. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. Underground Coal Gasification research and development in the United States: Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 59-128.
- CAPP, J.P.; LOE, R.W.; SIMON, D.W. **Underground Gasification of Coal, 1945-1960: A bibliography**. Washington: U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Information Circular, California of University, 1963, 233 p.
- CAPP, J.P.; PLANTS, K.D.; FIES, M.H.; PEARS, C.D.; HIRST, L.L. **Underground Coal Gasification of Coal: Second Experiment in preparing a path through a Coalbed by Hydraulic Fracturing**. Washington: U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1961, 32 p.
- CASTAGNA, J.P.; BATZLE, M.L.; EASTWOOD, R.L. Relationships between compressive wave and shear velocities in clastic silicate rocks. **Geophysics**, vol.50, n.º 4, p. 571-581. 1985.
- CLOSE, D.; CHO, D.; HORN, F.; EDMUNDSON, H. The Sound of Sonic: A historical Perspective and Introduction to Acoustic Logging. In: CHOPRA, S. (Editor Chefe). **Recorder: Hydrothermal reservoir Characterization**. Canadian Society of Exploration Geophysicists, vol. 34, n.º 05. p. 34-43. 2009.
- CROSS, C.; RIET, M.V.D. The Eskom UCG Experience. 6th Annual CLT & Coal Gasification 2011 Conference. Brisbane (Austrália). 2011.
- ELDER, J.L.; FIES, M.H.; GRAHAM, H.G.; CAPP, J.P.; SARAPU, E. **Field-Scale Experimental in Underground Gasification of Coal at Gorgas, ALA: Use of Eletrolinking-Carbonations a means of site Preparation**. California: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1957, 104 p.
- ELLIS, D.V.; SINGER, J.M. **Well Logging for Earth Scientists**. Nova Zelândia: Springer Science + Business Media B.V.n.º 2. 2007. 692 p.
- FIGUEIREDO, J.L.; MOULIJIN, J. A. **Carbon and Coal Gasification: Science and Technology**. Alvor (Portugal): NATO Advanced Study Institute on Carbon and Coal. 1985, 665 p.

- FORTIN, J.; STANCHITS, S.; DRESEN, G.; GUÉGUEN, Y. Acoustic emission and Velocities associated with the formation of compaction bands in sandstone. **Journal of Geophysical research**, vol. 111.p. 1-16. 2006.
- FRAZEN, C.; KRAUSE, D.; SIEDEL, H.; ULLRICH, B. Temperature impacto in cotta sandstone. In: **12th Internacional Congress on the Deterioration and Conservation of Stone**. Universidade de Colúmbia, Nova York. 1-9 p. 2012.
- GREEN, M. Underground Coal Gasification-A Power and Low Carbon Solution for India. 7th World Petro-Coal Congress. New Delhi. 2017.
- GUZZO, P.L. **Quartzo**. In: LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. CETEM-Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, n.º. 681-722 p. 2008.
- HABIL; KONIETZKY, H.; WANG, F. **Thermal Behavior of rocks**. 2018. 20 p. Geotechnical Institute. TU Bergakademie Freiberg. Freiberg (Alemanha). Notas de Aula.
- HARTMAN, H.L. Introduction Mining Engineering. In: ____ Cap 14. Novel Methods of Mining. Alabama: John Wiley & Sons. p. 496-547. 1987.
- HERRMAN, C. **Manual de Perfuração de Rocha**. São Paulo: Editora Polígono. 1972. 416 p.
- HILL, R.W.; CENA, R.; PAWLOSKI, G.A.; STEPHENS, D.R.; THOMPSON, D.; THORSNESS, C.B.; WILDERM D.G. **Summary Report on Large Block Experiments in Underground Coal Gasification, Tono Basin, Washington: Vol.2 Excavation Results and General Conclusions**. California: Lawrence Livermore National Laboratory, Universidade da California, 1984, 60 p.
- INGRAM, D.K. **Surface Fractures Development over Longwall Panels in South-Central West Virginia**. Virginia: United States Department of the Interior (U.S. Bureau of Mines). Report of Investigations 9242. 1989. 18 p.
- ITO, H.; VILBISS, J.; NUR, A. Compressional and shear waves in Saturated Rock during Water-Steam Transition. **Journal of Geophysical Reasearch**, vol. 84, n.º B9. 4731- 4735 p. 1979.
- KALE, D.M. UCG-Country Status. Asia Pacific Partnership on Clean Developement and Climate. Making tomorrow brighter. 2018.
- KASANI, H.A. **Reservoir-Geomechanics of Underground Coal Gasification**. 2016. 215 f. Tese em Filosofia em Engenharia Geotecnica. Programa de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Calgary, Alberta (Canadá). 2016.

- KATELL, S.; FABER, J.H. **Estimated Costs of Gasifying Coal in Place: A Study based on Eletrolinking and Hydralic Fracturing Experiments of the Bureau of Mines**. Washington: U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1961, 12 p.
- KENTUCKY COAL EDUCATION. Kentucky Coal and Energy Education Project. 2018. Disponível em: http://www.coaleducation.org/q&a/who_discovered_coal.htm. Acesso em: 10 de Agosto de 2018.
- KING, M.S.; MARSDEN, R. Velocity dispersion between ultrasonic and seismic frequencies in brine-saturated reservoir sandstones. **Geophysics**, vol. 67, n. ° 1, p.254-258. 2002.
- KLIMENKO, A.Y. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. Early developments and inventions in Underground Coal Gasification. Reino Unido: Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 11-24.
- KOMAR, C.A. **Hardness, tensile Strength, and Impact toughness of Reservoir Sandstone at Extreme Temperatures**. Bureau of Mines Report of Investigation. Universidade tecnológica da Califórnia. Unites States Department of the Interior. 1971. 8 p.
- KULANDER, B.R.; DEAN, S.L.; WARD, B.J (Jr). **Fractures Core Analysis: Interpretacion, logging, and use of natural and induced fractures in Core**. Oklahoma (USA): AAPG Methods in Exploration Series, n. °8. 1990, 86 p.
- LELEDEV, E.B.; RYZHENKO, B.N.; BURKHARDT, H.; ZHARIKOV, A.V.; ROSHCHINA, I.A.; KONONKOVA, N.N.; ZEBRIN, S.R. Influence of Fluid Composition on the Elastic Properties os Sandstone and Quartzite at High Temperature and Pressure in Application to the Problem of Crustal Waveguides. **Physical of the Solid Earth**. Izvestiya (Rússia), vol. 50, n.° 50, 367-377 p. 2014.
- LIMA, P.H.A.; SOARES, J.A.; ALMEIDA, L.R.B. Correlação entre a resistência à compressão uniaxial e propriedades elastodinâmicas de rochas sedimentares de diferentes formações Estadunidenses. **Sociedade Brasileira de Geofísica (SBG)**. 2016. p.1-5.
- LORENZ, J.C.; COOPER, S.P. **Atlas of Natural and Induced Fractures in Core**. Oxford: Wiley Blackwell; AAPG. 2018. 300 p.
- LÜ, C.; SUN, Q.; ZHANG, W.; GENG, J.; QI, Y.; LU, L. The Effect of High temperature on tensile strength of sandstone. **Applied Thermal Engineering**. Editora Elsevier, vol. 111, 573-579 p. 2017.
- LUO, J.; WANG, L. High-temperature Mechanical Properties of Mudstone in the Process of Underground Coal Gasification. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. Nova York: Springer. Vol. 44. p. 749-754. 2011.

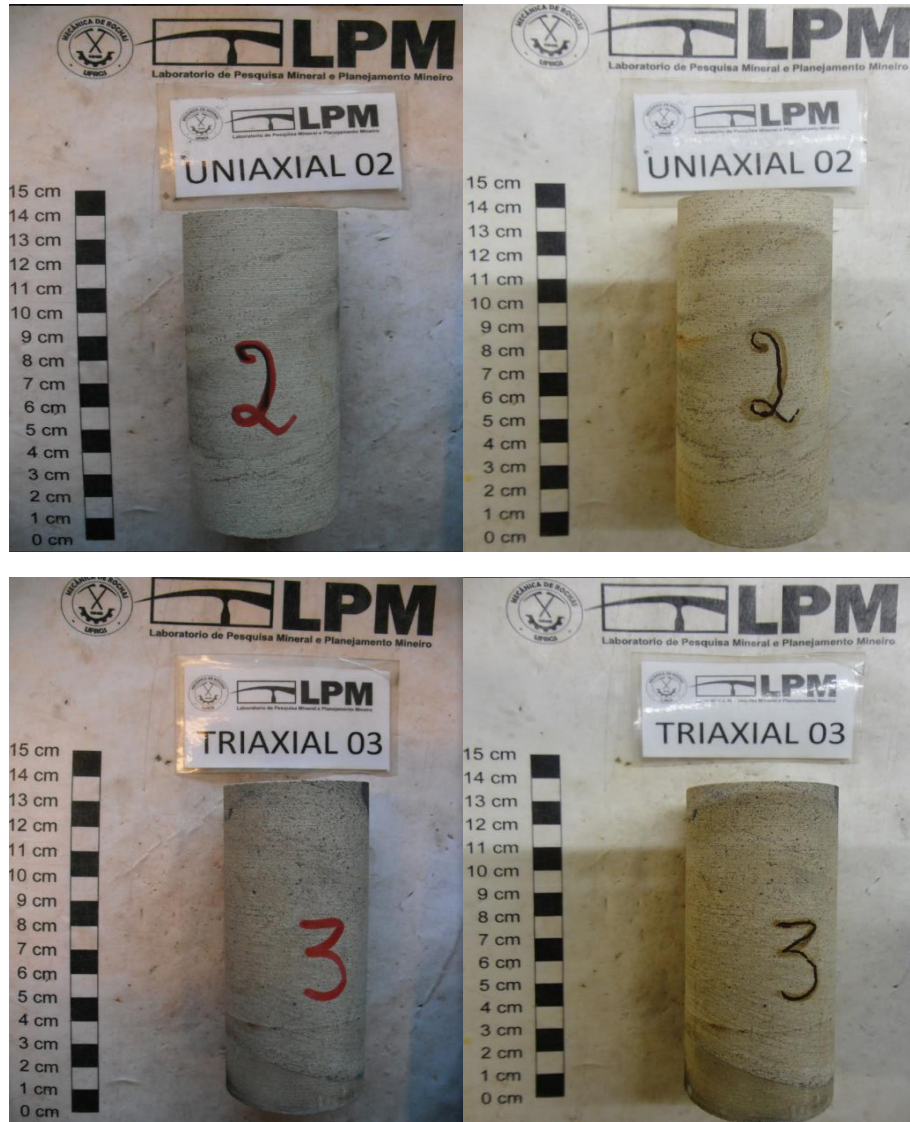
- MAZZOCCHI, V.L. **Estudo das fases α , β do quartzo com difração múltipla de Nêutrons**. 1964, 202 p. Dissertação de Mestrado na área de Tecnologia Nuclear Básica. Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares. São Paulo, 1964.
- MERRITT, R. **Coal Exploration, Mine Planning and Development**. New Jersey: Noyes Publications. 1986. 464 p.
- MORRIS, R.L.; GRINE, D.R.; ARKFELD, T.E. Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for the location of fractures. **Journal of Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers. vol. 6. n.º6. 623- 632 p.1964.
- ORLOV, G.V. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. The effects of rock deformation in Underground Coal Gasification. Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 173-212.
- PAZDZIORA, J. **Design of Underground Hard-Coal Mines**. Warszawa (Polônia): Elsevier. 1988. 238 p.
- PERSHAD, S. UCG- Eskom's Experience and Future Pojects. FFF Workshop to Presento n the Developments in South Africa-Is there Gas. 2016.
- PERSHAD, S.; PISTORIUS, J.; VAN DER RIET, M. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. Majuba Underground Coal Gasification Project. Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 173-212.
- PICKETT, G.R. Acoustic Character logs and their Applications in Formation Evaluation. Shell Development Co. Houston (Texas). **Journal of Petroleum Technology**. Society of Petroleum Engineers, vol. 15, n.º 6. 639-667 p. 1963.
- RAO, M.S.; BHASKAR, G.U.; KAREKAL, S. Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Coal Measures of Pranhita-Godavari Valley, India Using Sonic Logs. Austrália, **2015 Coal Operators' Conference**. University of Wollongong, p. 36-47.
- RIET, M.V.D. Case Estudy: Underground Coal Gasification (UCG)-Majuba Update. African Utility Week. Durban (África do Sul). Eskom's.2010.
- ROGERS, R.; RAMURTHY, K.; RODVELT, G.; MULLEN, M. Coalbed Methane: Principles and Practices. Starkville: Oktibbeha Publishing.1994. 504 p.
- ROY, D. G.; SINGH, T.N. Effect of Heat treatment and Layer Orientation on the tesile Strength of a Crystalline Rock Under Brazilian Test Condition. **Rock Mechanis and Rock Engineering**, vol. 49, n.º 05. 1663-1677 p. 2016.

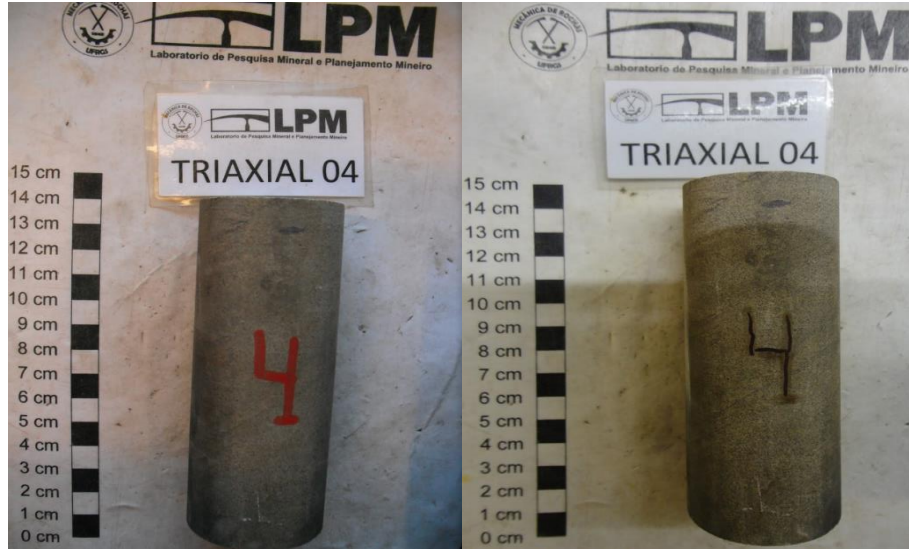
- SAPTIKOV, I.M. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. History of UGC development in the USSR. Reino Unido: Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 25-58.
- SARHOSIS, V.; KAPUSTA, K.; LAVIS, S. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. Underground Coal Gasification in Europe: Field Trials, laboratory Experiments, and EU-funded projects. Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 129-172.
- SEBATHIAN, J.J.S.; EDEBURN, P.W.; BONAR, F.; BONIFIELD, L.W.; SCHMIDT, L.D. **Laboratory-Scale work on Synthesis -Gas Production**. Alasca: U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1951, 52 p.
- SEIDLE, J. **Fundamentals of Coalbed Methane: Reservoir Engineering**. Oklahoma: Pennwell Corporation. 2011. 401 p.
- SEIFI, M. **Simulation and Modeling of Underground Coal Gasification using Porous Medium Approach**. 2014. 148 f. Tese em Filosofia (Doutorado em Engenharia Química e Petróleo). Programa de Engenharia Química e Petróleo. Universidade de Calgary, Alberta (Canadá). 2014.
- SERRA, O. **Fundamentals of well-log interpretation: The interpretation of logging data**. Amsterdam (Nova Zelândia): Elsevier Science Publishers. 1986. 679 p.
- SERRA, O. **Well Logging Handbook**. Paris: Editora TECHNIP/ Well Seismic Techniques. In: _____. *Seção J-Acoustic Logging: Sonic Transit time measurements. Sonic Amplitude and attenuation measurements*. 2008. 433-500 p.
- SIMBECK, D.R.; KORENS, N.; BIASCA, F.E.; VEJTASA, S.; DICKENSON, R.L. **Coal Gasification Guidebook: Status, Applications, and Technologies**. California: Electric Power Research Institute. Gasification Power Plants Program Generation & Storage Program, Final Report. 1993. 78 p.
- SJØGREN, B.; ØFSTHUS, A.; SANDBERG, J. Seismic Classification of Rock Mass Qualities. **Geophysical: Prospect**, vol. 27. p. 409-442. 1979.
- SRIAPAI, T.; WALSR, C.; FUENKAJORN, K. Effect of temperature on compressive and Tensile strengths of Salt. **Science Asia**, vol. 38. 166-174 p. 2012.
- STACEY, P. Guidelines for Open Pit Slope Design. In: READ, J.; STACEY, P. *Fundamentals os Slope design*. Austrália, Nova Zelândia e África do Sul: CSIRO Publishing/ CRC Press. 1-14 p. 2010.
- STEPHENS, D.R.; O'NEAL, E.M. **LLNL Underground Coal Gasification Project Annual Report-Fiscal Year 1984**. Califórnia: Lawrence Livermore National Laboratory. 1985, 70 p.

- SUN, H.; SUN, Q.; DENG, W.; ZHANG, W.; LÜ, C. Temperature effect on microstructure and –Wave propagation in Linyi Sandstone. **Applied Thermal Engineering**: Editora Elsevier, vol. 115. 913-922 p. 2017.
- SYGALA, A.; BUKOWSKA, M.; JANOSZEK, T. High temperature versus geomechanical parameters of selected rocks - the present state of research. **Journal of Sustainable Mining**. Vol.12, n.º 4, p. 45-51. 2013.
- TANTAN, Z.; HONGWEN, J.; HAIJIAN, S.; QIAN, Y.; MINGRUI, D.; GUANSHENG, H. Physical and Mechanical properties of Sandstone containing a single fissure after exposure to high temperatures. **International Journal Science and Technology**. Editora Elsevier. Vol. 26, 2016. 319-325 p.
- THAKUR, P. **Advanced reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane**. Cambridge: Elsevier. 2017. 210 p.
- TITTMAN, J. **Geophysical Well Logging**: Excerpted from Methods of Experimental Physics, Vol.24: Geophysics. Florida: Academic Press/ Harcourt Brace Jovanovich, 1986. 175 p.
- VILLAESCUSA, E. **Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping**. In: _____. *Rock Mass Characterization*. Nova York, Boca Raton e Londres: CRC Press, 2014. 113- 190 p.
- WALKER, L. **Underground Coal Gasification research and development in the United States**. In: BLINDERMAN, M.S.; KLIMENKO, A.Y. The development of UCG in Australia. Woodhead Publishing: Series in Energy. 2018, p. 173-212.
- WINKLER, K.W.; MURPHY III, W.F. Acoustic velocity and attenuation in Porous Rocks. In: AHRENS, T.J. **Rock Physics & Phase Relations**: A Handbook of Physical Constants. Florida: AGU References Shelf 3. 20-34 p. 1995.
- YANG, D.; SHENG, Y.; GREEN, M. UCG: Where in the World?. TCE Chemical Engineer. n.º 872. p. 38-41. 2014.
- YANG, S.; XU, P.; LI, Y.; HUANG, Y. Experimental Investigation on Triaxial mechanical and permeability behavior of sandstone after exposure to different high temperature treatments. In: BROMLEY, C.J.; SCHILL, E.; BRUHN, D.; CHIASSON, A.; BARBIER, E. **International Journal of Geothermal Research and its Applications**. Gangtok (India): Editora Elsevier. Vol. 69. p. 93-109. 2017.
- ZULFAHMI; SYAFRI, I.; ABDURRKHIM; WATTIMENA, R.K. Thermal effects of geomechanics characteristics of soft rocks from M. Enim Formation. **The 2017 World Congress on Structural Engineering and Mechanics (ASEM 17)**. Ilsan (Coréia). 2017.

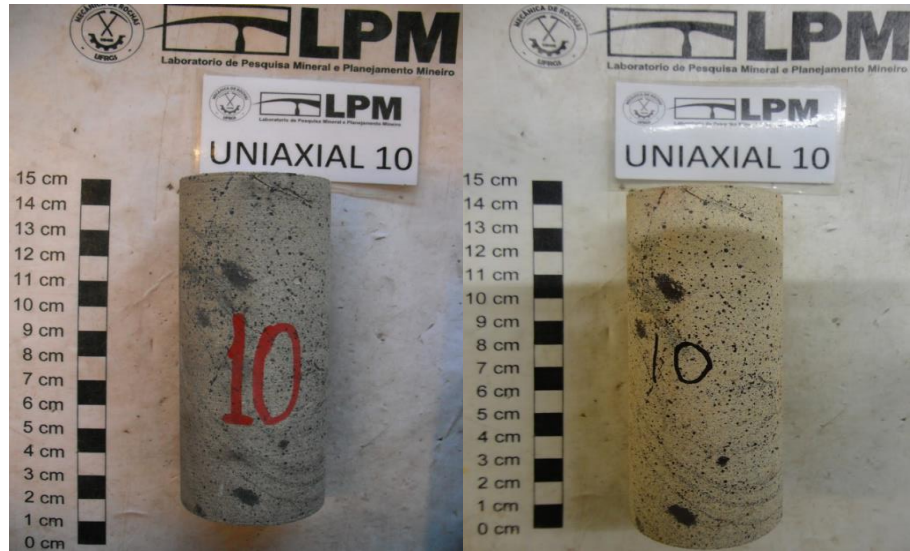
ANEXOS

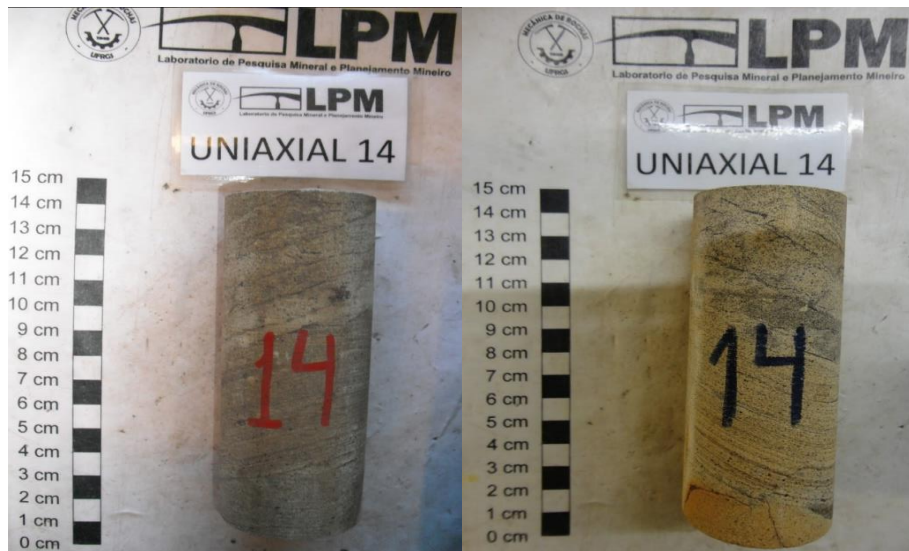
ANEXO 1- Comparação dos Corpos de Prova antes e depois do Tratamento térmico







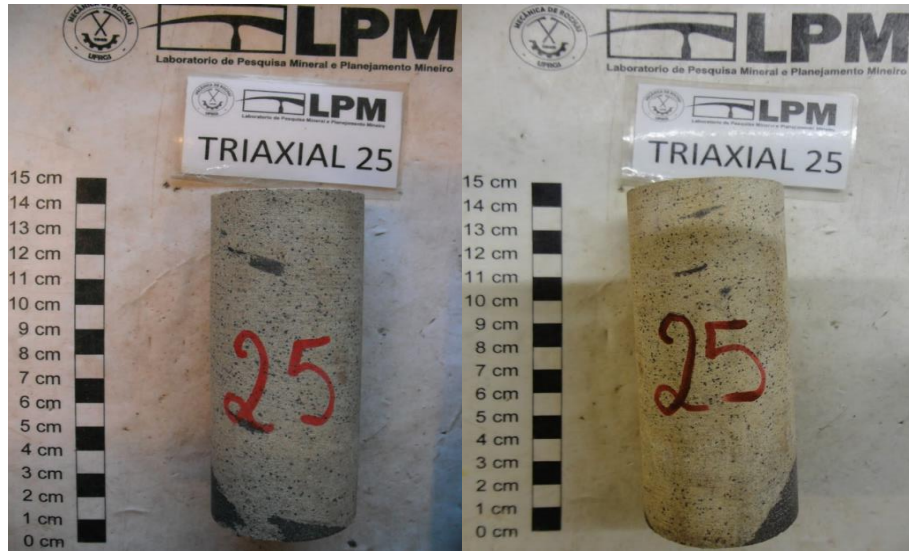














ANEXO 2- Corpos de Prova Ensaaiados











ANEXO 3- Mudanças Perceptíveis nos Corpos de Prova com o tratamento térmico
Amostra 21: Mudança de Cor (Gradiente Térmico).



Amostra 14: Mudança evidente da coloração entre litologias e aumento do espaçamento (indicado pela seta).



Amostra 2 e 15T: Gradiente térmico na Descontinuidade, Aura de mudança litológica (indicado pela seta).



Amostras 24: Evidência do Gradiente de temperatura paralelo ao plano da descontinuidade.



Amostra 15T: *Micro Cracks* formados durante o aquecimento, em destaque (em vermelho).



Amostra 19: Dilatação anisotrópica no contato litológico (Arenito e camada de siltito).



ANEXO 4-Corpos de Prova submetidos aos ensaios de Tração Indireta

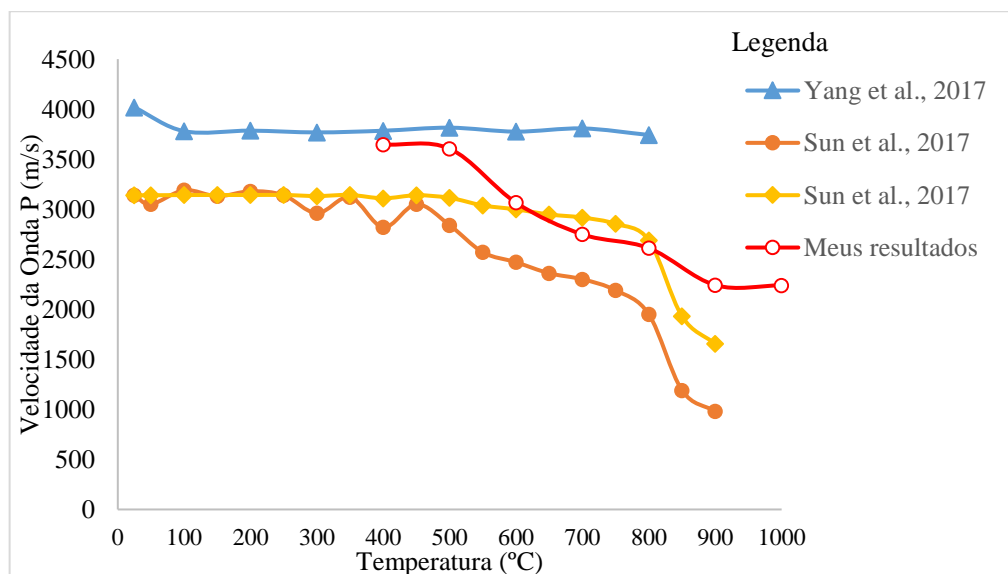
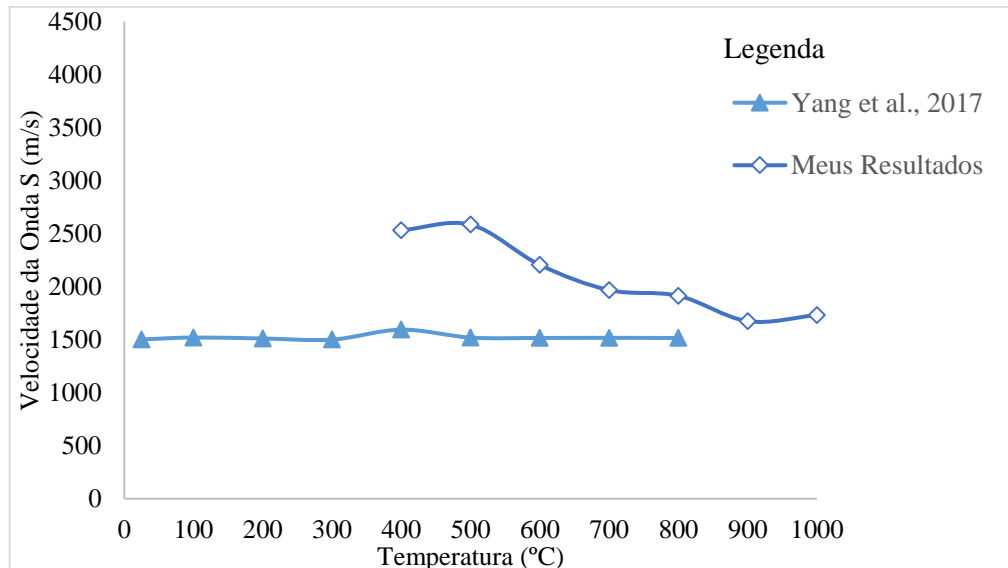




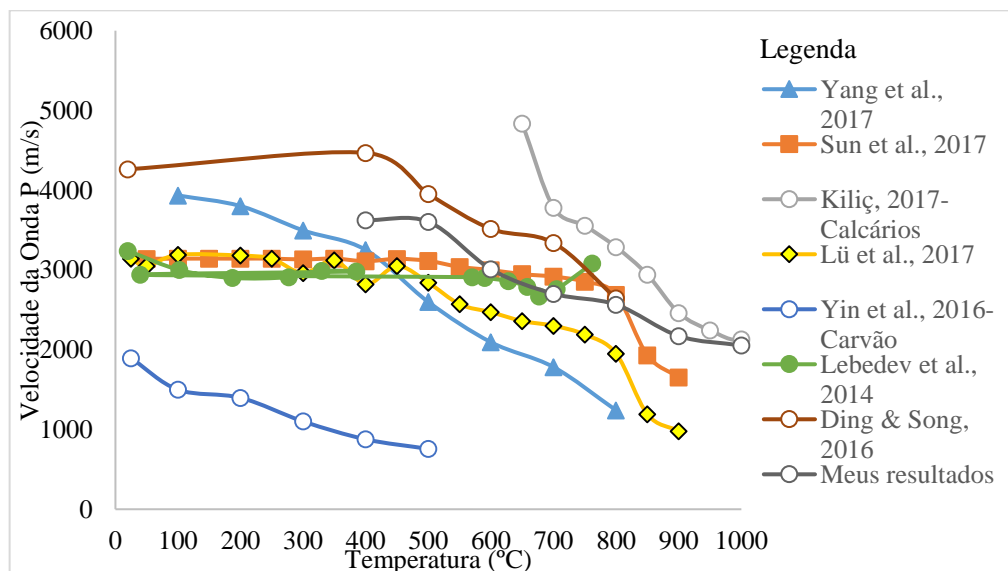
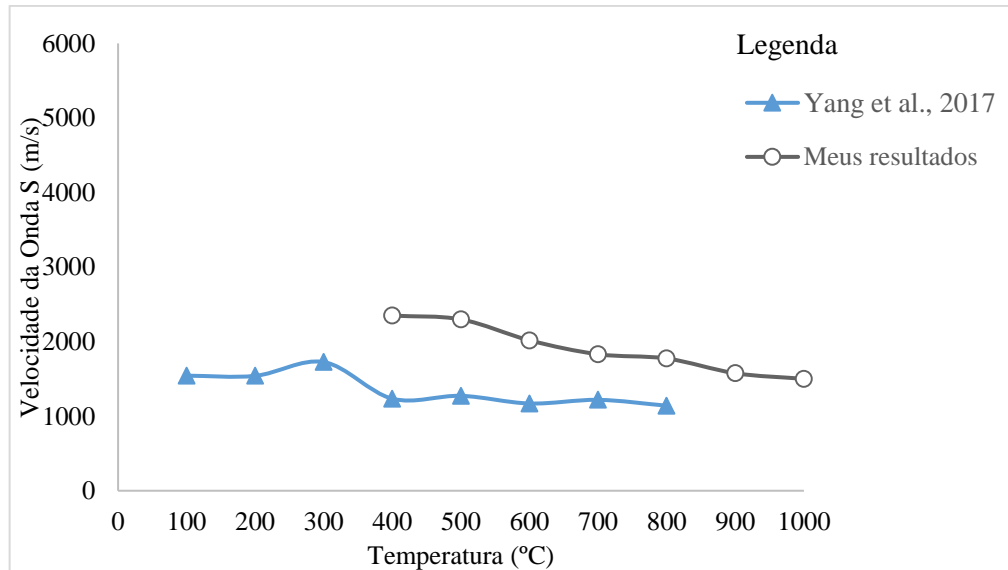
ANEXO 5- Comparação com os trabalhos anteriores.

Neste tópico iremos retornar os gráficos apresentados no capítulo 3 e são comparados agora com os resultados obtidos nos ensaios.

Velocidade das medidas Ultrassônicas antes do Tratamento térmico

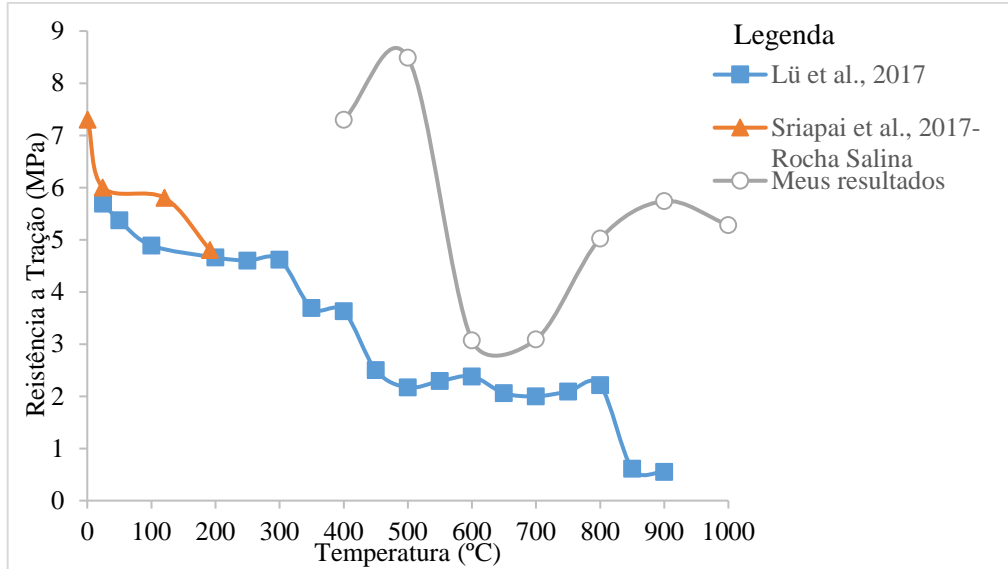


Velocidade das medidas Ultrassônicas depois do Tratamento térmico

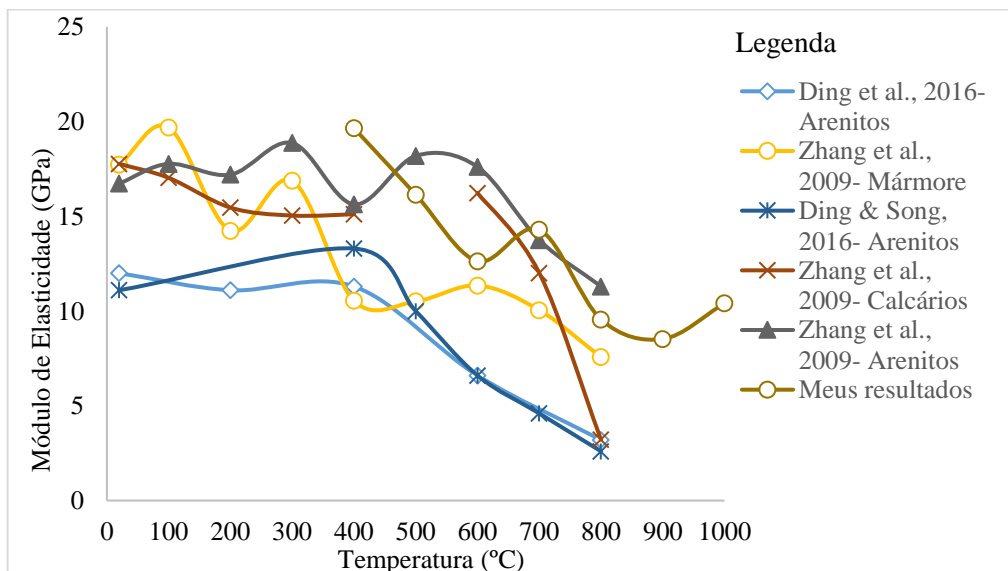
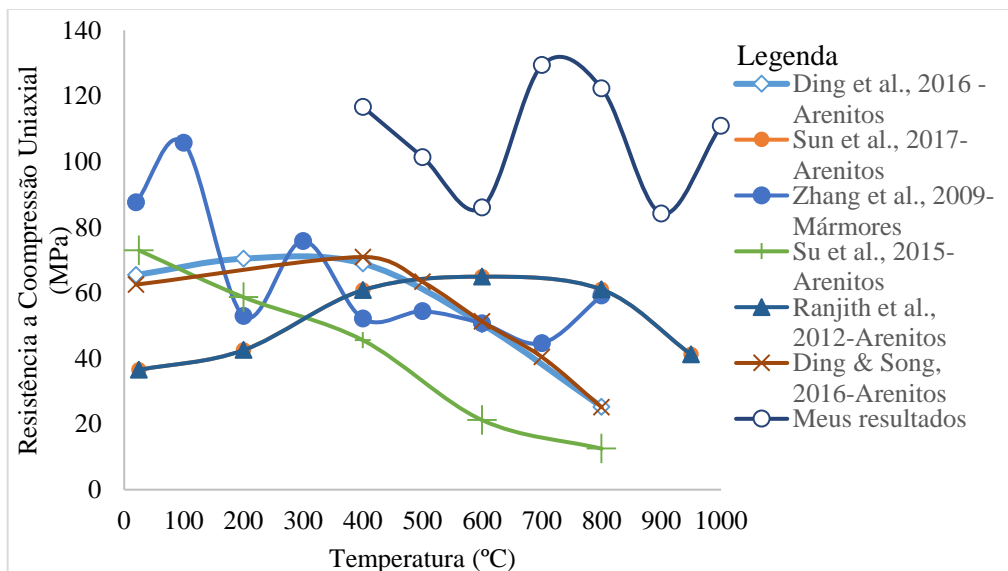


Resistência a Compressão e Resistência a Tração Indireta com a temperatura com a temperatura

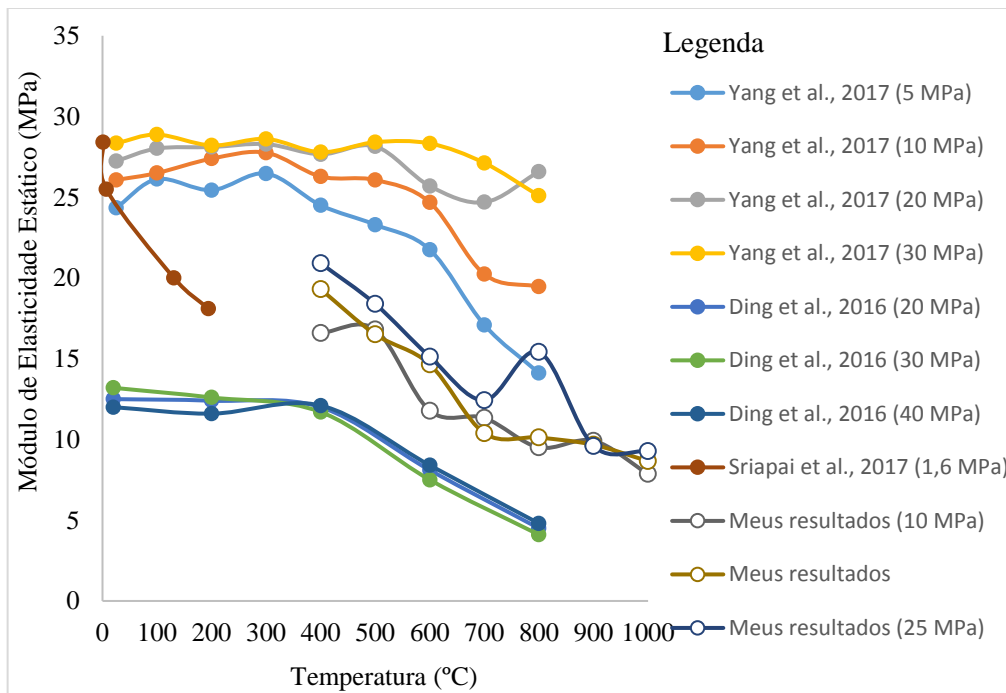
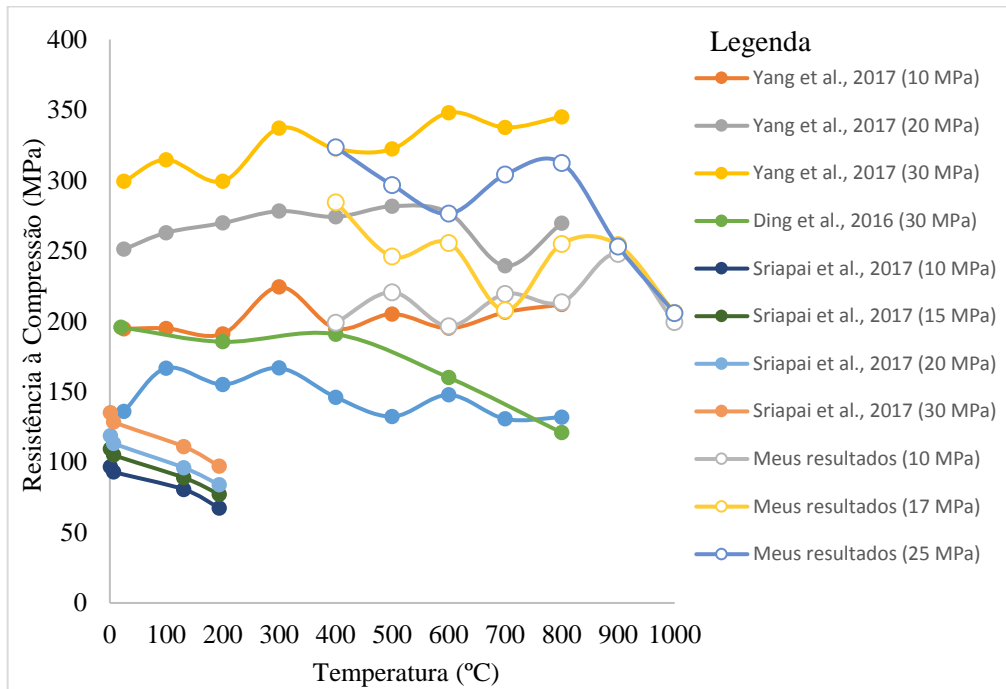
Resistência à Tração com o ensaio Brasileiro



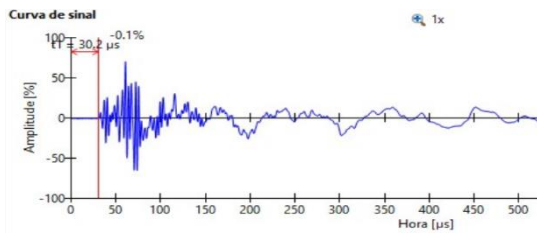
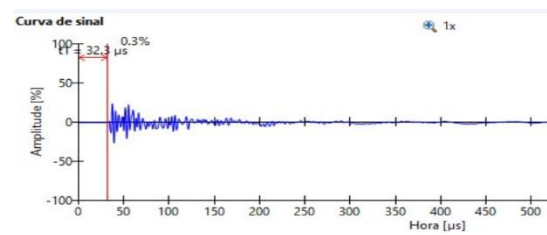
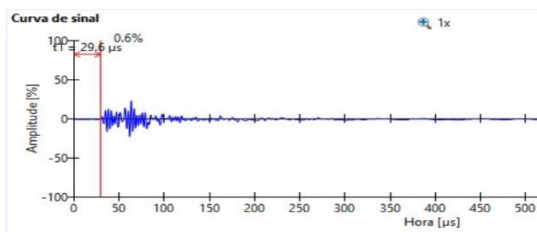
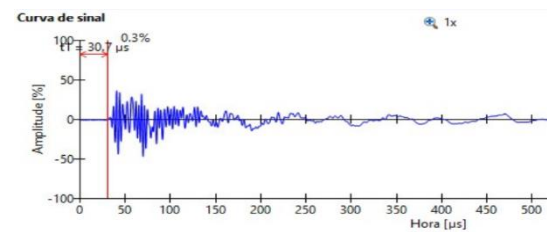
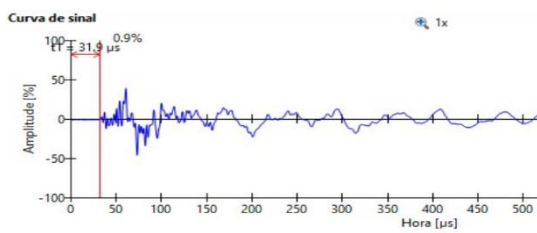
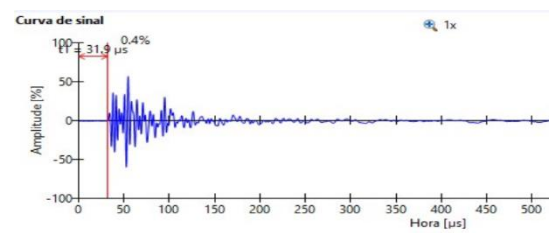
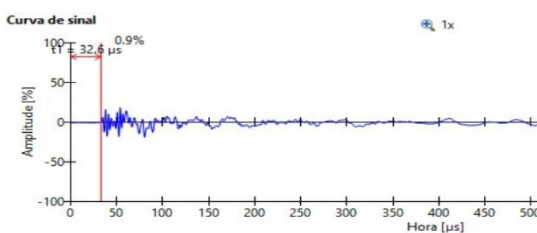
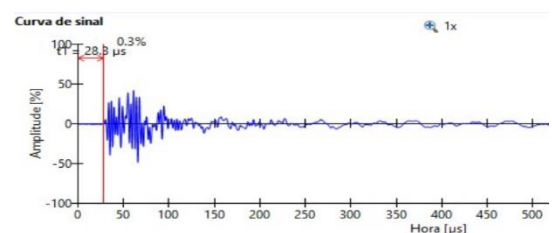
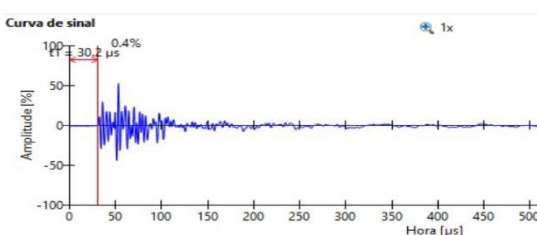
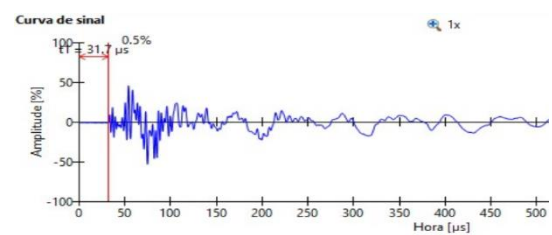
Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade Estático com os ensaios uniaxiais.



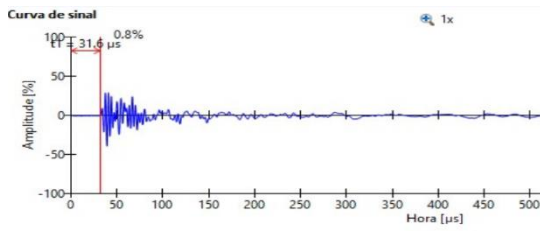
Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade Estático com os ensaios triaxiais.



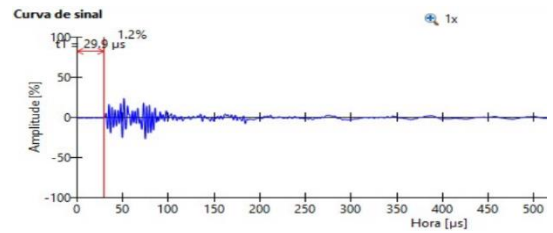
ANEXO 6- Ondas sônicas nas amostras antes do Ciclo de Aquecimento e Resfriamento.

Amostra 2: $t_p = 30.2 \mu s$ $t_s = 48.5 \mu s$ Amostra 3: $t_p = 32.3 \mu s$ $t_s = 45.9 \mu s$ Amostra 4: $t_p = 29.6 \mu s$ $t_s = 45.0 \mu s$ Amostra 5: $t_p = 30.7 \mu s$ $t_s = 54.6 \mu s$ Amostra 6: $t_p = 31.9 \mu s$ $t_s = 45.8 \mu s$ Amostra 7: $t_p = 31.9 \mu s$ $t_s = 49.0 \mu s$ Amostra 8: $t_p = 32.6 \mu s$ $t_s = 48.8 \mu s$ Amostra 9: $t_p = 28.3 \mu s$ $t_s = 43.7 \mu s$ Amostra 10: $t_p = 30.2 \mu s$ $t_s = 47.7 \mu s$ Amostra 11: $t_p = 31.7 \mu s$ $t_s = 48.5 \mu s$ 

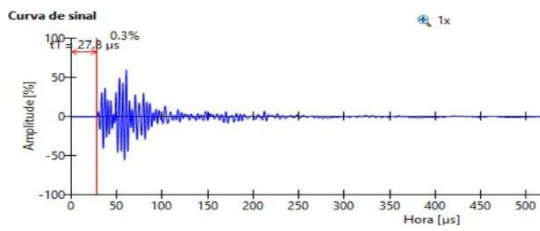
Amostra 12: $t_p = 31.6 \mu s$ $t_s = 48.0 \mu s$



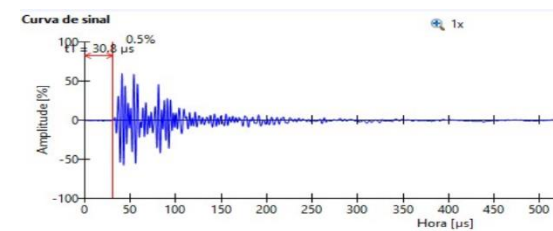
Amostra 13: $t_p = 29.9 \mu s$ $t_s = 46.0 \mu s$



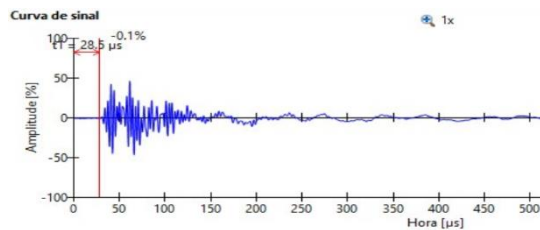
Amostra 14: $t_p = 27.8 \mu s$ $t_s = 47.2 \mu s$



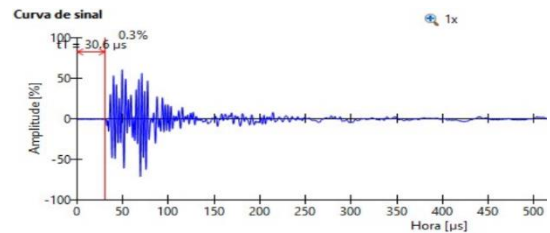
Amostra 15: $t_p = 30.8 \mu s$ $t_s = 50.3 \mu s$



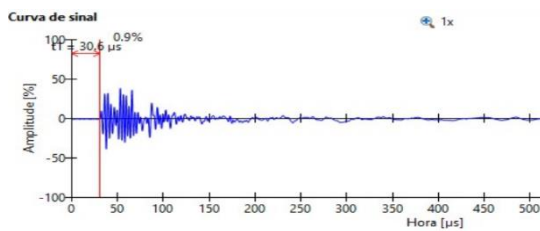
Amostra 16: $t_p = 28.5 \mu s$ $t_s = 55.2 \mu s$



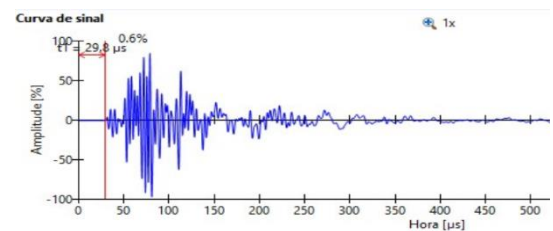
Amostra 17: $t_p = 30.6 \mu s$ $t_s = 47.5 \mu s$



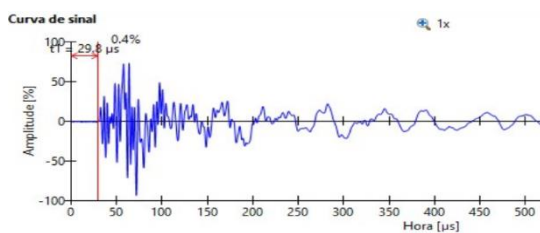
Amostra 18: $t_p = 30.6 \mu s$ $t_s = 49.7 \mu s$



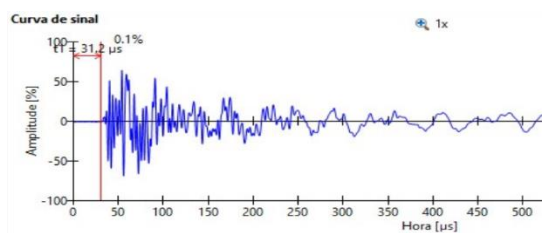
Amostra 19: $t_p = 29.8 \mu s$ $t_s = 49.2 \mu s$



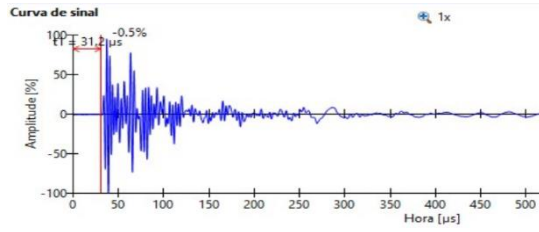
Amostra 20: $t_p = 29.8 \mu s$ $t_s = 46.4 \mu s$



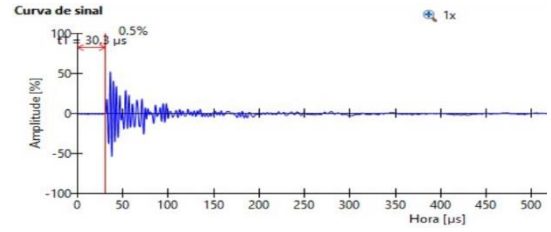
Amostra 21: $t_p = 31.2 \mu s$ $t_s = 49.4 \mu s$



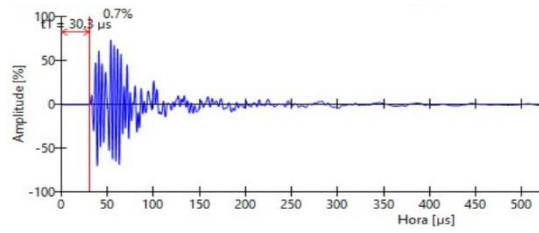
Amostra 22: $t_p = 31.2 \mu s$ $t_s = 47.8 \mu s$



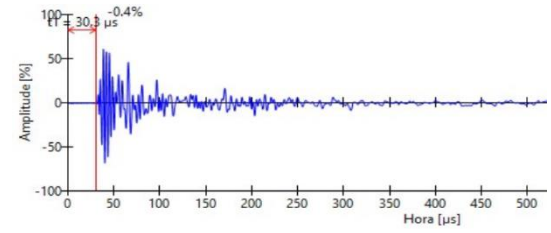
Amostra 23: $t_p = 30.3 \mu s$ $t_s = 49.6 \mu s$



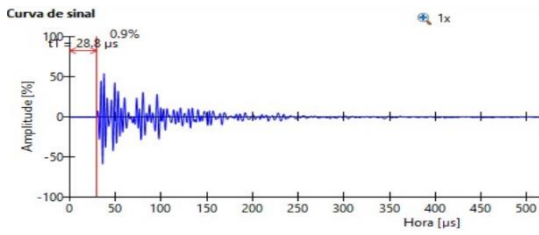
Amostra 24: $t_p = 30.3 \mu s$ $t_s = 49.6 \mu s$



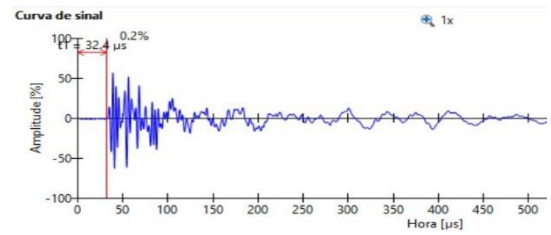
Amostra 25: $t_p = 30.3 \mu s$ $t_s = 49.3 \mu s$



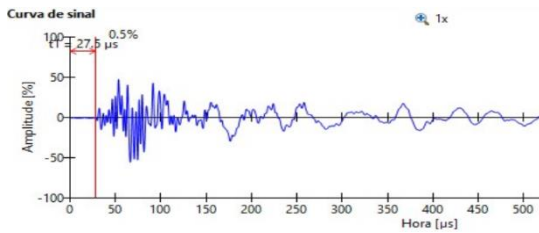
Amostra 26: $t_p = 28.8 \mu s$ $t_s = 44.4 \mu s$



Amostra 27: $t_p = 30.2 \mu s$ $t_s = 48.5 \mu s$



Amostra 28: $t_p = 27.5 \mu s$ $t_s = 46.6 \mu s$



Amostra 29: $t_p = 29.0 \mu s$ $t_s = 41.4 \mu s$

