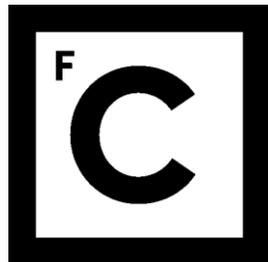


UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Caracterização Mineralógica e Mecânica de Rochas  
Graníticas Expostas a Elevadas Temperaturas**

João Cardoso Bernardo

Mestrado em Geologia Económica  
Especialização em Prospecção Mineral

Relatório de Estágio orientado por:

Professora Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes, FCUL  
Professora Doutora Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva,

IST

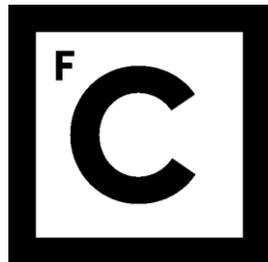
2020







UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Caracterização Mineralógica e Mecânica de Rochas  
Graníticas Expostas a Elevadas Temperaturas**

João Cardoso Bernardo

Mestrado em Geologia Económica  
Especialização em Prospecção Mineral

Relatório de Estágio orientado por:

Professora Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes, FCUL  
Professora Doutora Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva,

IST

2020



À minha família,  
Albertina Bernardo  
João Carlos Bernardo  
Maria José Cardoso



## Agradecimentos

O primeiro agradecimento é para a Professora Maria Isabel Fernandes, que me orientou durante toda a tese, não é por acaso que o fez, já que era a orientadora científica da tese presente. A sua orientação foi mais que aquela que é comum, a sua compreensão quando eu encontrava alguma dificuldade ou achava que não estava a ir como eu desejava, ela arranjava sempre as palavras certas para me guiar. O facto de mesmo quando eu desaparecia durante algum tempo (às vezes, bastante) não perder a confiança em mim e que eu estaria a desenvolver a tese mesmo não aparecendo à superfície. E por último por achar sempre que eu estava a fazer um trabalho melhor que aquele que eu achava, não houve um dia que eu não tenha entrado no seu escritório descontente com o desenvolvimento da tese (maioria das vezes por problemas ou então falta de crença que ia completar tudo a tempo) em que passado apenas 10 minutos de conversa a professora desse a volta à minha massa cinzenta e me convencesse que realmente estava a conseguir coisas interessantes. Por isso um muito obrigado por durante este período me ter orientado, ensinado várias coisas e pelas pequenas conversas que tivemos.

A Professora Matilde Costa e Silva do IST que foi a orientadora externa que supervisionou todos os processos feitos no GEOLAB do Instituto Superior Técnico, um muito obrigado por tudo. Graças à sua disponibilidade e cuidado conheci todas as instalações onde iria fazer os ensaios e colocou-me à vontade. A paciência para me explicar tudo, desde o mais simples que eu já deveria ter registado até certos assuntos que transcendiam a minha área de estudo habitual. Pela preocupação que teve ao longo de todo o período pelo qual me orientou, e a sua simpatia contagiante em todos os momentos, mesmo quando parecia estar a “dar-me nas orelhas” por não saber como se fazia ou era o processo, a sensação era que estava apenas a explicar pela primeira vez.

Ao Professor Jorge Figueiras que me ajudou na resolução da parte mineralógica da minha tese, porque sem as suas sábias palavras eu nunca teria conseguido resolver o enorme problema que os meus queridos minerais me colocaram. Obrigado pela paciência e capacidade de me explicar certas coisas que eu tenho noção que já deveria saber.

Ao Senhor Fernandes, o técnico que faz o GEOLAB trabalhar todos os dias da semana, pelo acompanhamento em todos os processos e me ensinar a fazer todos os passos de cada um, como também pelo fabrico dos provetes todos que foram necessários. Pela sua disposição e disponibilidade em ajudar sempre que precisava como também pelas todas as conversas circunstanciais que tivemos.

A Professora Maria Amélia Dionísio, do IST, o meu anjo clandestino durante todos os processos de laboratório e em especial nas crises geológicas que tive durante estes quase dois anos. Mesmo não sendo orientadora (interna ou externa) foi quem estava sempre por ali quando eu precisava, o seu sentido de detectar que eu estava tendo alguma crise é apuradíssimo, porque em todos os momentos ela apareceu. Obrigado por todas as dicas e orientações que me deu e por me iluminar em todos os momentos

que eu andava na escuridão do conhecimento. Eternamente grato a todas as conversas geológicas, sociais, familiares, etc. que tivemos.

Ao Professor Carlos Galhano da FCT, que disponibilizou um chromameter quando os dois que havia avariaram ambos nas minhas mãos. Pelo facto de ter demonstrado um enorme interesse pelo tema da tese e colocar à disposição os materiais que tinha caso eu precisasse. E sem me esquecer um obrigado por ter-me feito “professor” (mesmo que por 10 minutos) durante a sua aula para mostrar como o que eles estavam a estudar tinha alguma aplicação na sociedade. Foi uma experiência única para quem tende a ter algum receio de expor as ideias. Muito obrigado Professor Carlos!

Aos Professores Manuel Francisco Costa Pereira, Edite Martinho, Maria Orquídia Teixeira Neves, António Manuel Álvares Serrão Maurício e Gustavo Paneiro, todos pertencentes ao IST pela ajuda e companhia que me fizeram durante este tempo de tese. Obrigado por estarem sempre disponíveis para me ajudar e muitas das vezes apenas conversar sobre diversos assuntos.

Aos professores do mestrado de Geologia económica que durante o período de aulas tiveram a paciência e destreza de me fazer pensar e ver o mundo como um geólogo. É com maior orgulho que irei representar esta tão honrosa profissão. Um obrigado especial ao Professor António Mateus que mesmo com o seu jeito exigente e directo, em que muitas vezes me puxou as orelhas para ver se eu acordava para a vida, nunca desistiu mesmo quando eu achava que a minha pessoa já não tinha salvação.

Um agradecimento enorme para toda a minha família e amigos que me apoiaram desde o início nesta etapa da minha vida. Em primeiro lugar à minha Dona Albertina (minha querida e amada avó) que sem ela eu nunca teria alcançado este patamar, desde o primeiro dia que me acolheu até hoje que cuidou e me educou, muitas vezes à base do chinelo, mas sempre tentando do seu jeito mostrar o caminho certo. Tudo o que consegui até hoje é por ela e graças a ela, porque sei o quão importante é para ela que eu me torne “alguém”. Em segundo para a minha mãe que é aquela voz inspiradora (mesmo que muitas vezes irritante) tenta mostrar que a vida é difícil, mas não é por isso que devemos desistir da vida, porque na realidade se olharmos para o lado há sempre alguém pior que nós e eles não desistem. Obrigado por toda a força que me deste nesta etapa e em toda a minha vida, minha querida Mizé! Ao meu pai que ao seu jeito sempre me apoiou naquilo que fiz, mesmo que não demonstre na maioria das vezes e por me ter arranjado emprego que fosse compatível com os meus estudos, porque sem isso ter-me-ia sido impossível conseguir completar tanto a licenciatura como o mestrado. Um muito obrigado Pai!

Por fim, mas não por último, a uma menina muito especial Andreia Barata Santos que me acompanhou ao longo da licenciatura como também no mestrado, e que do seu jeito pelicular me puxou as orelhas e me colocou a pressão certa para eu completar esta tese. Em especial naqueles momentos de dúvida existencial, esteve sempre lá. Obrigado pela preocupação e carinho ao longo desta jornada. E para finalizar aos meus dois melhores amigos, Tiago Durão e Maria Rodrigues que me acompanham desde sempre e que estiveram sempre disponíveis para me fazer esquecer os problemas, com as sagradas saídas para cafés e jogatanas, sempre que foi possível. Obrigado meus queridos amigos que nunca me deixaram da mão.

## Resumo

As rochas graníticas são frequentemente utilizadas na ornamentação dos edifícios (exterior ou interior), em agregados e outras aplicações, o que justifica a necessidade de haver uma caracterização mineralógica, física e mecânica que garanta que são preenchidos os requisitos de cada uma das aplicações. No caso de Portugal esta rocha é utilizada com mais frequência no interior centro e norte devido à sua presença geológica, o que faz com tenha sido utilizada na construção, desempenhando não só uma função ornamental, mas também estrutural em numerosas vilas e aldeias. Nos últimos anos, mais propriamente entre 2017 e 2019, ocorreram no país vários incêndios que provocaram alguns danos no edificado das vilas e aldeias e, por isso, pretende-se com este trabalho estudar as alterações (mineralógicas e mecânicas) de um granito quando sujeito a temperaturas elevadas, para se perceber que tipo de influência a temperatura tem na estrutura da rocha.

Estudaram-se duas amostras do mesmo granito, com diferentes estados de alteração, granito fresco (GFTE) e granito alterado (GATE), proveniente da pedreira de Açores (Celorico da Beira) da Mota-Engil. Foram preparados trinta e dois provetes para estudo das alterações produzidas no granito quando exposto a temperaturas elevadas, nomeadamente a 400°C (recriando um incêndio de pequena porções), a 500°C e a 600°C com o objectivo de verificar o efeito da transição do quartzo- $\alpha$  para  $\beta$  (573°C $\pm$ 1°C) nas características físicas e mecânicas da rocha. Fizeram-se, também, ensaios à temperatura ambiente para as duas amostras de granito para obter valores de referência. Efectuaram-se ensaios de determinação da porosidade aberta, da massa volúmica, de capilaridade, de compressão uniaxial, o ensaio brasileiro e a velocidade de propagação das ondas P e S. O estudo petrográfico focou-se na caracterização macro e microscópica das amostras antes e após aquecimento, realizando-se também análises por difracção de raio-X. Recorreu-se à microssonda electrónica para identificar as alterações na composição dos cristais de biotite e os produtos de preenchimento formados nas fracturas.

Os resultados dos ensaios efectuados permitiram concluir que a rocha começa a perder resistência após o aquecimento a 400°C, mas é aos 600°C que se verifica a queda abrupta nas características mecânicas (resistência à compressão e à tracção), aumentando a porosidade e a capilaridade. Entre os 400°C e os 500°C não se observam alterações significativas. Considera-se que as alterações mais evidentes entre os 500°C e os 600°C são causadas pela transformação de quartzo  $\alpha$  para  $\beta$  e à inversão do mesmo durante o arrefecimento da rocha. A expansão e posterior contracção térmica do quartzo provocam a criação de fracturas (intra e intergranulares). Neste granito com abundantes megacristais de feldspato verificou-se que estes são também fortemente afectados pelo aumento de temperatura.

Palavras-Chave: Granito; Temperatura; Resistência Mecânica; Composição Mineralógica.



## Abstract

Granitic rocks have various applications in our society, from ornamental stone to aggregates, and therefore the study of the characteristics and mineralogy is needed to comply with the requirements for each application. In Portugal granitic rock is used with more frequency in the northern and center interior, due to its geological abundance. So, most towns and villages have their buildings made from granites. In the last few years, from 2017 to 2019, there had been big wildfires that affected most of the countryside of Portugal, damaging some local houses and buildings in the villages and towns. The objective of this work is to study the characteristics (mineralogical, physical and mechanical) of a selected granite when it is exposed to high temperatures.

The selected granite is subdivided in two samples, fresh granite (GFTE) and weathered granite (GATE), collected in the Mota-Engil Quarry in Açores (Celorico da Beira). Thirty-two specimens were prepared in order to study the effect of the exposition to high temperatures, the lower of 400°C, to recreate a small fire, and then 500°C and 600°C. Besides the recreation of a wildfire, it aimed at analysing the influence of the transformation of quartz- $\alpha$  to  $\beta$  (573°C $\pm$ 1°C) on the physical and mechanical characteristics of the rock. Specimens were also tested at room temperature as reference. The laboratory performed focused on the measurement of open porosity, density, water absorption, uniaxial compression strength, tensile strength and ultrasound velocity. The petrographic study included the macro and microscopic observation, X-ray fluorescence and X-ray diffraction. Electron probe microanalysis was carried out to study the variation of the chemical composition of the biotite crystals due to heating and to identify the products filling the cracks.

The results acquired from the various test permitted to conclude the granite starts to lose its mechanic characteristic since the first temperature tested (400°C), but it was at 600°C degrees that the highest lost in mechanic characteristic occurred, main due to the transformation of quartz- $\alpha$  to  $\beta$  and its inversion during the cooling. The thermal expansion and contraction of quartz during each transformation originates new fractures or intensifies the pre-existing ones. It was also concluded that the abundant megacrysts of feldspar are also affected by the exposition to high temperature.

Keywords: Granite; High-Temperature; Mechanical Resistance; Mineral Composition.



# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas.....	xix
1. Introdução.....	1
2. Enquadramento geológico.....	2
3. Estado de arte .....	3
3.1 Mineralogia .....	3
3.2 Fracturas.....	4
3.3 Porosidade Aberta e Massa Volúmica.....	5
3.4 Absorção de água .....	6
3.5 Velocidade de propagação das ondas P e S.....	6
3.6 Resistência à tracção .....	7
3.7 Resistência à compressão e deformabilidade .....	8
3.8 Cor.....	9
4. Materiais e Métodos .....	11
4.1 Preparação das Amostras.....	11
4.1.1 Análise Petrográfica .....	12
4.1.2 Microsonda Electrónica .....	12
4.1.3 Difração de Raio-X (DRX) .....	13
4.2 Aquecimento / Arrefecimento .....	14
4.3 Determinação da Porosidade Aberta e da Massa Volúmica.....	15
4.4 Absorção de água .....	16
4.5 Determinação da velocidade das ondas P e S.....	17
4.6 Determinação da Resistência à Tracção .....	18

4.7 Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial e da Deformabilidade .....	19
4.8 Cor .....	21
5. Resultados .....	22
5.1 Análise Petrográfica .....	22
5.1.1 Observação macro e microscópica .....	22
5.1.2 Microsonda electrónica.....	28
5.1.3 Difracção de raio-X .....	34
5.2 Fracturas .....	35
5.3 Porosidade aberta e Massa Volúmica.....	38
5.4 Absorção de água .....	41
5.5 Velocidade da propagação das ondas P e S.....	44
5.6 Resistência à tracção .....	46
5.7 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade .....	47
5.8 Cor.....	50
6. Discussão.....	53
6.1 Análise Petrográfica .....	53
6.1.1 Microscopia e microsonda electrónica.....	53
6.1.2 Difracção de raio-X .....	54
6.2 Fracturas .....	54
6.3 Porosidade e Massa volúmica .....	55
6.4 Absorção de água .....	57
6.5 Velocidade da propagação das ondas P e S.....	59
6.6 Resistência à tracção .....	61
6.7 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade .....	63
6.8 Cor.....	68
Considerações finais.....	71
Referências Bibliográficas .....	74
Anexos.....	77
Anexo 1. Enquadramento geográfico .....	77

Anexo 2-Mineralogia .....	78
Anexo 3- Porosidade e Massa volúmica .....	81
Anexo 4- Absorção de água por parte da rocha .....	83
Anexo 5-Fracturas .....	84
Anexo 6-Velocidade das ondas P e S .....	85
Anexo 7- Resistência à Tracção .....	87
Anexo 8- Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade .....	88
Anexo 9- Cor.....	94



## Lista de Figuras

Figura 2. 1 Localização geográfica e geológica da pedreira da Mota-Engil. Excerto da Carta Geológica 18-A, Vila das Naves, à escala 1/50000 (site do LNEG). .....	2
Figura 3.6.1: Resistência à tracção para várias temperaturas testadas em dois granitos, adaptado de Török e Török (2016).....	7
Figura 3.7.1: a) Gráfico da resistência à compressão do granito e a sua deformação após o arrefecimento. b) Gráfico da resistência à compressão do granito e a sua deformação durante o aquecimento. Ambos adaptados de Ying et al. (2016).....	9
Figura 4.1.1: Provetes preparados para o projecto: provetes prismáticos GFTE e GATE, assim como discos GFTE e GATE.....	11
Figura 4.2.1: Mufla <i>EHRET MUFFLE FURNACE</i> (modelo MO L 3; 5; 9;11/ S27) da <i>Nabertherm.</i> .	14
Figura 4.3.1: a) Provetes GATE num recipiente em água com 3 mm de profundidade, no início do ensaio. b) Provetes GATE e GFTE num recipiente em água com 3 mm de profundidade, no final do ensaio.	17
Figura 4.5.1: Utilização do osciloscópio, amplificador e transmissores no método directo da medição da propagação do som.....	17
Figura 4.6.1: Prensa hidráulica com um provete de GFTE, em disco, para efectuar o ensaio brasileiro (tracção).....	19
Figura 4.7.1: Provelte GFTE na prensa hidráulica preparado para o ensaio de compressão uniaxial....	20
Figura 5.1.2.1: Fractura com preenchimento na amostra GATE, a 500°C. Mapa de elementos obtido à ME. Preenchimentos composto maioritariamente por Al, Fe e Si. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Al em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Si em evidência. ....	31
Figura 5.1.2.2: Fractura com preenchimento na amostra GATE, a 600°C. Mapa de elementos obtido à ME. Preenchimento composto maioritariamente por Al, Fe e Mg. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Al em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Mg em evidência. ....	32

Figura 5.1.2.3: Mapa de elementos obtido à ME. Fractura com preenchimento composto maioritariamente por Ca, C e Al. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Ca em evidência; C- Imagem apenas com elemento C em evidência (nota: na fractura à esquerda do veio o carbono deve-se à existência da resina de preparação da lâmina delgada) ; D- Imagem apenas com elemento Al em evidência. ....	33
Figura 5.1.2.4: Mapas de elementos obtidos à ME mostrando a variação de composição de um cristal de biotite. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento K em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Mg em evidência. ....	34
Figura 5.2.1: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 400°C. A- GATE com fracturas intergranulares preenchidas por óxidos. B- GATE com fracturas intergranulares preenchidas por óxidos (imagens 1.1. e 1.2 em N//). C- GFTE com fracturas intergranulares preenchidas e não preenchidas (imagem à microsonda). ....	35
Figura 5.2.2: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 500°C. A- Fracturas intergranulares no contacto entre Qz-Kf-Plg-Bt e intragranulares no quartzo e plagióclases. B- Fracturas intergranulares no contacto entre Qz-Bt-Plg e intragranulares nas plagióclases. C- Fracturas intragranulares no quartzo e plagióclase e intergranulares no contacto entre Qz-Bt-Kf (imagens em NX). ....	36
Figura 5.2.3: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 600°C. A- Fracturas intragranulares e intergranulares sem preenchimento e uma fractura intra-intergranular preenchida por carbonatos (GFTE). B- Fractura intragranular que atravessa um grão de quartzo e se liga a uma intergranular entre cristais de quartzo e feldspato (GATE). C- Fracturas intergranular a contornar os bordos entre feldspato potássico e quartzo (GFTE) (imagens em NX). D- Fracturas intragranulares no quartzo e na plagióclase, e também uma fractura intergranular com preenchimento amorfo a cortar tanto a plagióclase como o quartzo (GATE) (imagem à microsonda). ....	37
Figura 5.2.4: GATE e GFTE após aquecimento superior a 600°C: o GATE foi sujeito à temperatura de 800°C enquanto o GFTE foi a 700°C. ....	38
Figura A1.1: Enquadramento geográfico: Localização da pedreira da Mota-Engil. ....	77
Figura A2.1: Difractograma da amostra GF25-2. ....	78
Figura A2.2: Difractograma da amostra GA25-4. ....	78
Figura A2.3: Difractograma da amostra GATE-3. ....	79
Figura A2.4: Difractograma da amostra GAT. ....	79
Figura A2.5: Difractograma da amostra GFT. ....	80
Figura A2.6: Difractograma da amostra GFTA-1. ....	80

Figura A5.1: a) Fracturas intragranulares na amostra GFTE a 400°C; b) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 400°C; c) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 500°C; d) Fracturas intragranulares na amostra GATE a 500°C; e) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 600°C; f) Fracturas intergranulares na amostra GATE a 600°C. ....	84
Figura A8.1: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 25°C. ....	90
Figura A8.2: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 400°C. ....	91
Figura A8.3: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 500°C. ....	92
Figura A8.4: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 600°C. ....	93



## Lista de Tabelas

Tabela 5.1.2.1: Composição química dos minerais da amostra GFTE analisados à microsonda. ....	28
Tabela 5.1.2.2: Composição química dos minerais da amostra GATE analisados à microsonda. ....	29
Tabela 5.1.2.3: Composição química dos minerais da amostra GATE após aquecimento a 400°C.....	29
Tabela 5.1.2.4: Composição química dos minerais da amostra GATE após o aquecimento a 500°C...	29
Tabela 5.1.2.5: Composição química dos minerais da amostra GATE após o aquecimento a 600°C...	30
Tabela 5.1.2.6: Composição química dos minerais da amostra GFTE após aquecimento a 600°C. ....	30
Tabela 5.1.3.1: Amostras analisadas na difracção de raio-X.....	34
Tabela 5.3.1: Porosidade do GFTE às várias temperaturas.....	39
Tabela 5.3.2: Porosidade do GATE às várias temperaturas. ....	39
Tabela 5.3.3: Massa volúmica de GFTE às várias temperaturas.....	40
Tabela 5.3.4: Massa volúmica de GATE às várias temperaturas. ....	40
Tabela 5.4.1: Taxa de absorção de água a 400°C para GFTE e GATE.....	41
Tabela 5.4.2: Taxa de absorção de água a 500°C para GFTE e GATE.....	42
Tabela 5.4.3: Taxa de absorção de água a 600°C para GFTE e GATE.....	42
Tabela 5.5.1: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 25°C.....	44
Tabela 5.5.2: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 400°C.....	45
Tabela 5.5.3: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 500°C.....	45
Tabela 5.5.4: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 600°C.....	46
Tabela 5.6.1: Ponto de rotura médio para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 25°C.....	46
Tabela 5.6.2: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 400°C.....	46
Tabela 5.6.3: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 500°C.....	47
Tabela 5.6.4: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 600°C.....	47
Tabela 5.7.1: Valor médio padrão do ponto de rotura de GFTE e GATE à compressão uniaxial. ....	48

Tabela 5.7.2: Valores do ponto de ruptura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 400°C.....	48
Tabela 5.7.3: Valores do ponto de ruptura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 500°C.....	48
Tabela 5.7.4: Valores do ponto de ruptura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 600°C.....	49
Tabela 5.7.5: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$ e $\nu_s$ ) e dinâmico ( $E_d$ e $\nu_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 25°C.....	49
Tabela 5.7.6: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$ e $\nu_s$ ) e dinâmico ( $E_d$ e $\nu_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 400°C.....	49
Tabela 5.7.7: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$ e $\nu_s$ ) e dinâmico ( $E_d$ e $\nu_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 500°C.....	50
Tabela 5.7.8: Valores médios do módulo de elasticidade e razão de Poisson, estático ( $E_s$ e $\nu_s$ ) e dinâmico ( $E_d$ e $\nu_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 600°C.....	50
Tabela 5.8.1: Comparação dos parâmetros de cor padrão ( $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ ) do GFTE para as várias temperaturas testadas.....	51
Tabela 5.8.2: Comparação dos parâmetros de cor padrão ( $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ ) do GATE com as várias temperaturas testadas.....	51
Tabela 6.4.1: Comparação dos valores médios da absorção de água nas várias temperaturas.....	58
Tabela 6.5.1: Comparação da velocidade das ondas P nas várias temperaturas.....	60
Tabela 6.5.2: Comparação da velocidade nas ondas P nas várias temperaturas.....	61
Tabela 6.8.1: Comparação do $\Delta E^*$ nas várias temperaturas para o GFTE e GATE.....	69
Tabela A3.1: Medições e pesagens das amostras GA25.....	81
Tabela A3.2: Medições e pesagens das amostras GATE.....	81
Tabela A3.3: Medições e pesagens das amostras GF25.....	82
Tabela A3.4: Medições e pesagens das amostras GFTE.....	82
Tabela A4.1: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 25°C.....	83
Tabela A4.2: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 400°C.....	83
Tabela A4.3: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 500°C.....	83
Tabela A4.4: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 600°C.....	83

Tabela A6.1: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE à temperatura ambiente.....	85
Tabela A6.2: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 400°C. ....	85
Tabela A6.3: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 500°C. ....	86
Tabela A6.4: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 600°C. ....	86
Tabela A7.1: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 25°C. ....	87
Tabela A7.2: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 400°C. .....	87
Tabela A7.3: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 500°C. .....	87
Tabela A7.4: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 600°C. .....	87
Tabela A8.1: Ponto de rotura de GFTE e GATE a 25°C.....	88
Tabela A8.2: Ponto de rotura de GFTE e GATE a 400°C.....	88
Tabela A8.3: Ponto de rotura de GFTE e GATE a 500°C.....	88
Tabela A8.4: Ponto de rotura de GFTE e GATE a 600°C.....	88
Tabela A8.5: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 25°C. ....	89
Tabela A8.6: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 400°C. ....	89
Tabela A8.7: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 500°C. ....	89
Tabela A8.8: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 600°C. ....	89
Tabela A9.1: Valores médios dos parâmetros para cada amostra analisada do GFTE e GATE a 25°C. .....	94
Tabela A9.2: Valores médios dos parâmetros para cada amostra analisada do GFTE e GATE nas diversas temperaturas. ....	94



## Lista de Abreviaturas

GFTE	Granito Fresco - Temperatura elevada
GATE	Granito Alterado - Temperatura elevada
GFTE-B	Granito Fresco - Ensaio Brasileiro
GATE-B	Granito alterado - Ensaio Brasileiro

Al	Alumínio
Bt	Biotite
Fe	Ferro
Flpd	Feldspato
Kf	Feldspato potássico
Mg	Magnésio
Plag	Plagioclase
Qz	Quartzo
Si	Silício

ME	Microsonda Electrónica
N//	Observação em nicóis paralelos
NX	Observação em nicóis cruzados

# 1. Introdução

A utilização das rochas graníticas como material de construção é comum em Portugal, existindo vários monumentos e habitações que são construídos com este tipo de rocha, muito utilizada como rocha ornamental. Dependendo da região do país, as populações tendem a utilizar a rocha local para a construção tanto das habitações como dos próprios monumentos. Na zona centro e norte do país é onde se verifica a maior utilização da rocha granítica para a construção de monumentos e habitações.

Os fogos florestais são um evento catastrófico que tem acompanhado a sociedade ao longo da sua existência. Com o desenvolvimento das tecnologias de comunicação, atualmente é possível ter uma visualização directa da dimensão e da devastação causada pelos incêndios, tanto na natureza como nas povoações que se encontram no seu caminho. Com os eventos de 2017 na memória, em cerca de 5 meses arderam cerca de 540 mil hectares (EFFIS, 2017), várias vidas se perderam e centenas de casas arderam ou ficaram destruídas, podemos perceber que todas as vilas afectadas pelos fogos tiveram casas parcial ou completamente destruídas pelo fogo. Questiona-se, então, se as casas que resistiram e tem como material principal a rocha granítica são habitáveis ou se há risco para as pessoas que voltam a refazer as suas vidas nelas, já que o granito (como qualquer rocha) sofre modificações mineralógicas e texturais quando sujeito a temperaturas elevadas, o que pode alterar significativamente as suas propriedades físicas e mecânicas podendo assim colocar a integridade do edificado em risco.

Os fogos naturais podem atingir 1200°C (Wolton et al., 2012) , mas a temperatura média ronda os 800°C a 1000°C (Zehfuss e Hosser, 2006) e, dependendo do tempo de exposição dos edifícios às chamas, o grau de destruição pode ser bastante variável, por isso houve casas completamente destruídas e outras em que apenas se destruiu o recheio.

Este trabalho irá focar-se nas alterações físicas, mecânicas e mineralógicas do granito quando sujeito a temperaturas equivalentes às de um fogo de grandes proporções. As temperaturas utilizadas serão de 400°C (temperatura de um fogo de pequenas proporções), 500°C(temperatura intermédia) e 600°C(é considerada na literatura como a temperatura crítica para a estrutura do granito, como também é considerada uma temperatura de um fogo de grandes proporções. O granito estudado é proveniente da pedreira da Mota-Engil, em Celorico da Beira.

## 2. Enquadramento geológico

O granito estudado neste projecto é proveniente da pedreira da Mota-Engil, localizada no distrito da Guarda, a 2.5km da aldeia de Açores na freguesia de Celorico da Beira (Figura A1.1).

A pedreira situa-se na área coberta pela Carta Geológica de Vila Franca das Naves (Figura 2.1), 18-A à escala 1/50000. A região é composta essencialmente por granitos, com alguns afloramentos de xisto e xisto-migmatíticos, filões e depósitos de cobertura de idade recente (Teixeira et al., 1963).

Na zona da pedreira é caracterizada por granito porfiróide de grão grosseiro, monzonítico. Esta rocha tem uma tonalidade cinzento-azulada quando fresca e pode ser definida como uma rocha leucomesocrática. A textura dominante neste granito é porfiroide, devido aos megacristais de feldspato que são muito abundantes (Teixeira et al., 1963) e que podem atingir grandes dimensões (até 100 mm). É possível observar na pedreira uma zona de granito alterado e outra zona com granito fresco (dominante).

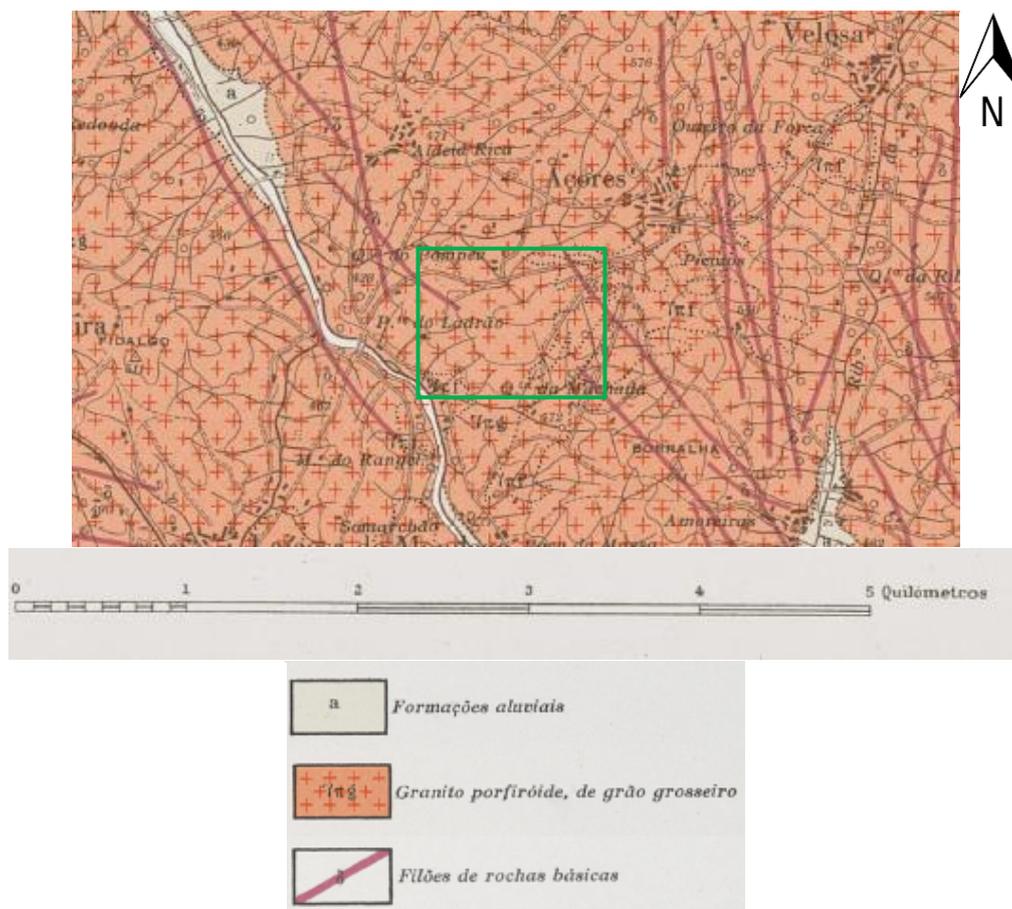


Figura 2. 1 Localização geográfica e geológica da pedreira da Mota-Engil. Excerto da Carta Geológica 18-A, Vila das Naves, à escala 1/50000 (Geoportal LNEG).

### 3. Estado de arte

As rochas têm características (propriedades físicas, mecânicas, mineralógicas e ornamentais), que as categorizam e diferenciam para as várias aplicações na indústria. Quando são submetidas a uma temperatura superior a ambiente (25°C), neste caso entre 400°C e 600°C, sofrem alterações nas suas características mecânicas que decorrem das alterações mineralógicas e físicas verificadas após incremento de temperatura.

A alteração que se verifica na rocha quando exposta a elevada temperatura tem sido abordada em inúmeros estudos que foram efectuados em material sedimentar (calcários), metamórfico (mármore) e ígneo (granitos). A taxa de aquecimento que é utilizada não segue uma norma, regra ou padrão, o que faz com que cada autor use a taxa de aquecimento que melhor se adequa aos seus objetivos. Os trabalhos publicados referem taxas de aquecimento diferentes para o granito variando entre 1 e 8.3°C/min (Martinho e Dionísio, 2018), valores bastante baixos quando comparados com as taxas apresentadas nas curvas paramétricas do fogo (>35°C/min). A temperatura máxima de 600°C utilizada neste trabalho teve como objectivo verificar qual seria o comportamento da rocha no momento da transformação do quartzo  $\alpha$  para  $\beta$ , já que está estimada aos 573°C. Esta transformação provoca um aumento de volume do mineral que, com o arrefecimento, um rearranjo geométrico da estrutura (transformação inversa) o que faz com que ocorra contracção do mineral. Esta variação volumétrica tem como consequência a alteração nas características que definem o granito como rocha ornamental ou para outras aplicações.

#### 3.1 Mineralogia

Os minerais constituintes das rochas e os aspectos texturais são os responsáveis pelo comportamento e características que estas possuem e que as diferenciam uma das outras. O granito é composto maioritariamente por quartzo, feldspato potássico, plagioclase e micas (biotite e/ou moscovite). Estes minerais têm propriedades distintas o que faz com que a resposta mecânica do granito seja influenciada directamente pelo comportamento dos minerais quando sujeitos a alterações químicas, físicas ou quando sujeitos a forças compressivas ou de tracção.

O quartzo- $\alpha$  é a forma mais comum de sílica e que é utilizado em várias indústrias e aplicações do dia-à-dia (Götze et al., 2012). O quartzo à temperatura ambiente e à pressão atmosférica tem uma estrutura hexagonal, conhecido como quartzo- $\alpha$ . Com o incremento da temperatura ou pressão este tende a rearranjar a sua estrutura para suportar as condições, o que se designa de polimorfos de sílica, já que o componente é sempre o mesmo, o que muda é a estrutura cristalina (Götze et al., 2012). A transformação que o quartzo sofre com o incremento de temperatura ocorre aos 573°C (Skinner, 1966), de quartzo- $\alpha$  para quartzo- $\beta$ . Esta transformação leva a que a estrutura tenha um aumento do volume instantâneo por parte do mineral (Skinner, 1966). O quartzo- $\alpha$  tem uma expansão térmica considerável

até aos 570°C, de 3.76% de aumento de volume, mas este aumento ocorre de uma forma gradual e de forma anisótropa com o incremento da temperatura, enquanto que quando é ultrapassado a temperatura dos 573°C, o incremento é instantâneo devido ao rearranjo da estrutura e isso equivale a um aumento de volume de 0.79%. Com o arrefecimento verifica-se a inversão da transformação, reduzindo o volume da estrutura instantaneamente (Klein, 2002).

Segundo Gomez Heras (2005) o quartzo presente no granito tende a apresentar fracturas de um modo aleatório com o incremento da temperatura, enquanto nos feldspatos as fracturas desenvolvem-se maioritariamente nos planos de clivagens e nas maclas da estrutura do mineral. O feldspato potássico não tem uma expansão térmica tão elevada como o quartzo, já que o seu volume só aumentou 0,9% quando atinge os 600°C (Skinner, 1966). Devido aos defeitos que pode apresentar na sua estrutura (maclas) como também à clivagem do mineral permite o desenvolvimento de fracturas. Segundo Gomez Heras (2005) a maioria das fracturas nos cristais de feldspato potássico e de plagioclase estão confinadas às suas maclas e clivagens, ao contrário do quartzo que tem uma expansão anisotrópica baixa o que faz com que as suas fracturas não tenham uma orientação preferencial.

A biotite, outro mineral constituinte do granito, também manifesta alterações com o aumento da temperatura, tal como verificado por Gomez Heras (2005). O autor registou microscopicamente que a biotite tende a adquirir uma cor escura, muitas vezes ficando opaca, surgindo uma zona de reacção na orla da mica com pleocroísmo diferente do resto do mineral.

### **3.2 Fracturas**

Segundo Gomez Heras (2005) a criação de fracturas deve-se à expansão térmica dos minerais, que formam novas micro fracturas ou ao aumento das que já existiam na rocha. Este autor não registou qualquer tipo de alteração mineralógica devido ao aumento de temperatura, mas a porosidade das amostras duplicou. Foram registados três tipos de fracturas, inter-, intra e transgranular, em que as mais importantes são as intergranulares nos processos de desagregação granular enquanto as outras duas favorecem o processo de escamação ou “spalling”. Observou também que as fracturas intra- e transgranulares são as primeiras a aparecer e são paralelas às faces dos cristais enquanto intergranulares aparecem depois perpendicularmente à superfície. O aumento da porosidade foi considerado como principal acelerador da alteração do feldspato para sericite.

Os autores Chen et al. (2017) verificaram que para o granito de Beishan, poucas fracturas resultaram do aquecimento (a temperaturas inferiores a 300°C), e que apenas se começaram a registar fracturas intergranulares ao se atingirem os 300°C. Após superarem esta temperatura conseguiram definir um patamar que leva à formação de fracturas nas bordaduras dos minerais, até cerca dos 573°C. Segundo os autores, a temperatura de 573°C é um segundo patamar que pode ser definido como o início das fracturas intra-granulares do feldspato e do quartzo. No feldspato normalmente estas tomam as direcções de clivagem, enquanto no quartzo podem ter qualquer direcção (Chen et al., 2017). Estes

autores presumiram que após exceder a temperatura de 573°C há um incremento das fracturas intergranulares e trans-granulares provocada pela expansão anisótropa do quartzo após a transformação de  $\alpha/\beta$ , que leva a um aumento de volume do quartzo (Chen et al., 2017).

### 3.3 Porosidade Aberta e Massa Volúmica

Os granitos são rochas com uma porosidade bastante baixa, o que os torna bastante apelativos para serem usados como rocha ornamental ou em outras aplicações, mas esta característica é influenciada por diversos factores, tais como grau de alteração, fracturação e granularidade.

Os autores Chaki et al. (2008) demonstraram que entre os 105°C e os 500°C a porosidade tem um ligeiro aumento, que foi interpretado como a reabertura de fracturas pré-existentes e a criação de novas fracturas, devido à expansão térmica verificada na rocha, que em cerca de 400°C apenas teve um aumento de 0.42% em relação à temperatura ambiente. No entanto quando as amostras foram sujeitas a 600°C houve um aumento significativo de porosidade, tendo este aumentado cerca de 1.75% em relação ao valor inicial.

Török e Török (2016) demonstraram que a variação da porosidade com a temperatura é influenciada pela porosidade inicial, como foi verificado ao analisarem dois granitos distintos em que um tinha uma porosidade inicial de 1.79% e o segundo de 0.81%. Após serem sujeitos a uma variação de temperatura (100°C a 600°C) a porosidade do primeiro aumentou para 5.42% (a 600°C) enquanto o segundo ficou com 1.36% (a 600°C). Com estes resultados os autores concluíram que há um aumento significativo da porosidade no granito na passagem dos 500°C para os 600°C. Quando a porosidade é testada para várias temperaturas, com maior amplitude do que as referidas acima, é possível perceber como é o comportamento desta quando é ultrapassada a temperatura da transformação do quartzo  $\alpha$  para  $\beta$  (573°C). Segundo Xu et al. (2008), a porosidade aumenta significativamente entre os 500°C e os 800°C, passando de 1.327% para 2.571%, o que equivale a um aumento de 93%. Tomando em consideração que a temperatura média de um fogo de grande escala é de 800°C a 1000°C, verifica-se que quando a rocha atinge os 1000°C adquire uma porosidade de 3.818% o que equivale a um aumento de 337% relativamente à porosidade da rocha à temperatura ambiente (0.873%).

A massa volúmica é uma propriedade da rocha, mas não é algo que possa ser usado para identificar uma rocha, já que é influenciada por muitos factores (mineralogia, grau de alteração, porosidade, etc.). Em todos os trabalhos em que foi determinada, houve uma diminuição da densidade do granito após o incremento da temperatura (e.g. Fan et al., 2017; Gautam et al., 2018; Yang et al., 2017).

Gautam et al. (2018), que testaram o granito de Jalore, obtiveram uma redução de densidade em todas as temperaturas aplicadas, em que aos 600°C obtiveram a maior diminuição, cerca de 5.58%. Fan et al. (2017) registaram num granito a diminuição da densidade com o aumento da temperatura,

verificando que até aos 400°C há um decréscimo muito suave e que, após ultrapassar o patamar dos 400°C, a diminuição da densidade é mais significativa.

### **3.4 Absorção de água**

O estudo da absorção de água por parte da rocha é bastante importante quando se trata de rochas ornamentais que são utilizadas tanto para construção de edifícios como para o revestimento exterior dos mesmos. Se a rocha possuir valores elevados de absorção de água isto pode significar um transporte mais rápido de soluções com sais e humidade que irão fazer com que a degradação da rocha seja mais rápida (Martinho & Dionísio, 2018).

Pires et al. (2014), que analisaram três granitos portugueses diferentes, obtiveram um aumento acentuado na absorção de água por capilaridade. Um dos tipos de granito teve um aumento de 1000%, após ter sofrido um aquecimento de 500°C, enquanto os outros dois tipos de granito analisados tiveram aumentos de 500% e 640%. Com isto demonstraram que a absorção de água tem alguma relação com a porosidade já que nos três granitos houve um aumento de porosidade, mas o que teve maior absorção de água por capilaridade não foi o mesmo que teve o maior aumento de porosidade. Este facto sugere que o transporte de água é facilitado não só pelo aumento da porosidade aberta mas também se pode dever ao aumento do número e comprimento das fracturas (Pires et al., 2014).

### **3.5 Velocidade de propagação das ondas P e S**

A medição da velocidade de propagação das ondas P e S há muito que é utilizada para medir indiretamente a porosidade, a rede de fracturas das rochas, para medir o “thermal damage” ou a alteração da rocha sem a destruir (Chen et al., 2017; Yang et al., 2017 e Zhang et al., 2018).

Dean et al. (2008) registaram um pequeno decréscimo na velocidade das ondas P, cerca de 12%, entre 105°C e 300°C. Ao atingirem a temperatura de 500°C a redução da velocidade foi de 30%, em comparação com a temperatura ambiente, mas foi entre os 500°C e os 600°C que registaram uma diminuição acentuada, cerca de 64%. Já Török e Török (2016) testaram dois granitos diferentes e verificaram que aos 600°C ambos tiveram uma redução acentuada na velocidade das ondas P, nomeadamente de 72% e 33%, em relação ao ensaio feito à temperatura ambiente.

Yang et al. (2017) mediram a velocidade nas ondas P para várias temperaturas (25°, 200°C, 400°C, 500°C, 600°C e 800°C) e obtiveram também uma redução na velocidade com o aumento da temperatura, destacando uma maior quebra a partir dos 600°C. No entanto, foi aos 800°C que registaram a maior diminuição da velocidade, cerca de 72% em relação à velocidade inicial.

Zhang et al. (2018) estudaram um granito que foi sujeito a temperaturas elevadas para estudar as alterações na sua estrutura. A velocidade das ondas P obtida é relativamente mais baixa que outros estudos publicados, com cerca de 3400 m/s à temperatura inicial. Os autores submeteram a amostra às seguintes temperaturas 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 900°C. A velocidade das ondas P diminuiu

sempre com o aumento da temperatura atingindo valores extremamente baixos, entre 1000 m/s e 600 m/s, após ser ultrapassada a temperatura de 600°C.

O granito de Beshian, estudado por Chen et al. (2017) foi sujeito a temperaturas entre 100°C e 700°C, com intervalo de 100°C entre cada temperatura de ensaio. A velocidade inicial das ondas P foi superior a 4300 m/s, diminuindo com o sucessivo incremento da temperatura, observando-se entre os 500°C e os 600°C uma queda abrupta da velocidade, de 3094 m/s para 1519 m/s.

### 3.6 Resistência à tracção

A resistência à tracção é uma característica da rocha que determina a capacidade da rocha quando é sujeita a forças de tracção. Zhao et al. (2018) testaram três granitos com granularidades diferentes a temperaturas entre 100°C e 400°C. Os três granitos evidenciaram a mesma tendência com o aumento da temperatura, observando-se diminuição da resistência à tracção. Estes resultados mostram ainda a influência que a granularidade da rocha tem na resistência (Zhao et al.,2018), já que o granito com valores mais baixos foi o granito de granularidade grosseira.

Török e Török (2016) testaram amostras de dois granitos diferentes, à tracção, após terem sido sujeitos a temperaturas de 300°C e 600°C (Figura 3.6.1). Os valores obtidos para a primeira temperatura apresentavam uma grande dispersão e alguns provetes mostraram valores superiores aos registados a 25°C, mas com o incremento da temperatura para os 600°C a queda da resistência da rocha à tracção é bastante evidente, obtendo valores abaixo dos 2.10 MPa, quando, à temperatura ambiente, ambos tinham valores de 4.08 e 5.97 MPa (Török e Török, 2016).

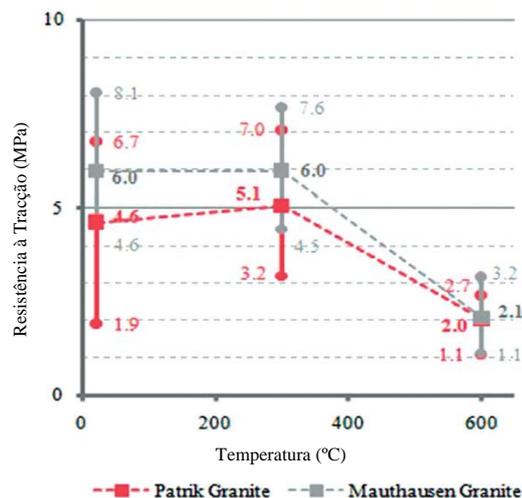


Figura 3.6.1: Resistência à tracção para várias temperaturas testadas em dois granitos, adaptado de Török e Török (2016).

Em todos os trabalhos consultados a rocha tende a perder resistência com o aumento da temperatura, não obstante as temperaturas estudadas serem inferiores às utilizadas no presente trabalho. No trabalho de Yin et al. (2016) o granito Laurentia é submetido a temperaturas entre 25°C e 850°C.

Uma vez mais observou-se que a resistência da rocha decresce com a temperatura, exceptuando aos 100°C em que há um aumento ligeiro na resistência à tracção. A perda da resistência é justificada pela expansão térmica diferencial dos minerais que compõem a rocha, principalmente a partir dos 600°C, já que a transformação do quartzo  $\alpha$  para  $\beta$  se dá à temperatura de 573°C (Yin et al., 2015).

### 3.7 Resistência à compressão e deformabilidade

O ensaio de compressão uniaxial é utilizado para determinar a resistência à compressão uniaxial e os parâmetros de deformabilidade (módulo de elasticidade ou de Young e o coeficiente de Poisson).

Alguns autores (e.g. Koca et al., 2006; Xu et al., 2008; Brotóns et al., 2013; Yin et al., 2016) registaram uma diminuição da resistência à compressão uniaxial com o aumento da temperatura.

A maioria dos trabalhos publicados mostra que nas rochas há uma relação inversa entre o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o aumento de temperatura, mas dedicam-se a calcários e mármore (e.g. Brotóns et al., 2013; Koca et al., 2006). Segundo Brotóns et al. (2013) para além da temperatura também o tipo de arrefecimento (rápido ou lento) influencia o comportamento da rocha, verificando que o coeficiente de Poisson é bastante mais baixo quando as amostras são arrefecidas com água (choque térmico).

Xu et al. (2008) concluem que, após atingir os 800°C, a resistência à compressão uniaxial do granito decresce abruptamente. O comportamento observado ao longo do estudo mostrou que até aos 800°C o granito tem um comportamento frágil semi-frágil e que, após ultrapassada esta temperatura, começa a ter um comportamento semi-dúctil, sendo que aos 1200°C são registadas deformações plásticas.

Yin et al. (2016) testaram a variação da resistência à compressão a diferentes temperaturas, diferenciando dois grupos de amostras. Observaram decréscimo da resistência à compressão para todas as temperaturas. Verificaram que entre os 100°C e os 400°C a deformabilidade não se alterou significativamente, mas quando se atingiam temperaturas entre os 600°C e 800°C, observava-se um aumento da deformabilidade (axial) de 0.05, demonstrando que a rocha apresenta um comportamento menos frágil (Figura 3.7.1.a). O mesmo não aconteceu com as amostras que não foram sujeitas a qualquer tipo de arrefecimento, ou seja, que foram ensaiadas à temperatura ensaiada. (Figura 3.7.1.b).

Alguns destes estudos foram feitos no âmbito da geotermia, todavia verificou-se a sua relevância para a análise do comportamento mecânico observado nos incêndios quando a rocha está sujeita a temperaturas elevadas. Os resultados obtidos por Shao et al. (2015) mostram que o pico da resistência à compressão e o módulo de elasticidade diminuem com o aumento de temperatura, acima dos 200°C. Porém é a partir dos 600°C que se regista uma diminuição acentuada nos valores referidos. Aos 800°C verifica-se uma mudança drástica no comportamento mecânico da rocha.

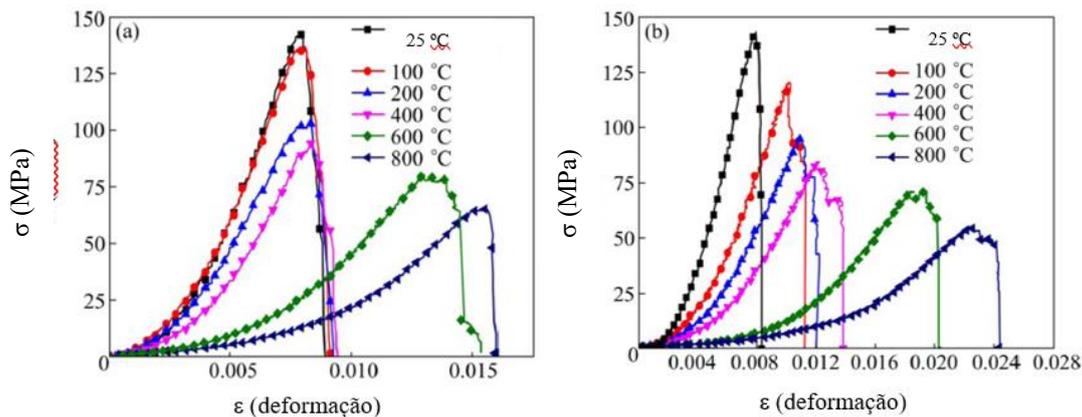


Figura 3.7.1: a) Gráfico da resistência à compressão do granito e a sua deformação após o arrefecimento. b) Gráfico da resistência à compressão do granito e a sua deformação durante o aquecimento. Ambos adaptados de Ying et al. (2016).

### 3.8 Cor

A cor é uma das primeiras características que se observam numa rocha e é definida pela composição química e pela mineralogia. Segundo Winkler (1997) existe uma correlação entre a cor e a mineralogia, mas também com a forma, o tamanho e o arranjo dos minerais.

As medições de cor nas rochas contribuem para definir se estas sofreram algum tipo de alteração ou, no caso em estudo, ajuda a definir a temperatura a que as rochas foram sujeitas. Na maioria dos estudos feitos, onde a cor é medida, é utilizado o método de medição de cor CIELab. Este método contempla vários parâmetros de cor que podem ser medidos, mas os mais utilizados são os parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  para caracterizar as cores da rocha. O  $L^*$  está referenciado nas coordenadas do eixo-z e corresponde às escalas dos cinzentos, em que é medida a luminosidade entre 0 (preto) e 100 (branco). Este parâmetro é conhecido como o eixo neutro. O  $a^*$  corresponde às coordenadas do eixo-x e define as cores entre verde e vermelho, enquanto o  $b^*$  está definido no eixo-y e representa as cores entre azul e amarelo.

Como a cor das rochas se deve à mineralogia que as compõe, alguns autores tentaram correlacionar a mudança de cor com alterações mineralógicas que possam acontecer devido à exposição a certas temperaturas (e.g., Chakrabarti et al., 1996; Hajpál e Török, 2004; Dionísio et al., 2009; Beck et al., 2016).

No estudo desenvolvido por Vazquez et al. (2016) foi registado um aumento nos valores dos três parâmetros com o incremento da temperatura. Os valores de  $L^*$  não variaram significativamente entre as temperaturas de 200°C e 400°C, variando apenas a temperaturas superiores. No caso do  $a^*$  os autores verificaram uma maior variação nos vários granitos testados e em todas as temperaturas. O parâmetro  $b^*$ , por sua vez, mostrou diferentes variações para cada granito analisado. Com a ajuda do  $\Delta E^*$ , parâmetro que define na totalidade a mudança de cor do material, foi possível definir as alterações de cor dos granitos. Todos tiveram valores abaixo ou ligeiramente acima da base do  $\Delta E^* > 2$ , que

representa uma alteração que já é visível à vista desarmada, para valores de temperatura de 200°C. O que levou a que os autores concluíssem que até esta temperatura é muito difícil verificar algum tipo de alteração de cor nas rochas. Ao atingir as temperaturas de 400, 600, 800 e 1000°C todos os valores de  $\Delta E^*$  são superiores a 3, verificando-se que quanto maior a temperatura maior o valor de  $\Delta E^*$ , o que demonstrou que a mudança de cor é correlacionável com o incremento de temperatura.

## 4. Materiais e Métodos

O granito é uma das rochas predominantes na paisagem do interior Norte e Centro de Portugal. No presente trabalho foi estudado o granito da pedreira da Mota-Engil em Açores-Celorico da Beira, a 24 km da Guarda. O granito explorado nesta pedreira é utilizado na produção de agregados para fabrico de betão e argamassa, na utilização em obras de engenharia civil e construção rodoviária, enrocamentos e misturas betuminosas.

Foram recolhidos oito blocos de granito de grande dimensão, com volumetria considerada suficiente para produção dos provetes para ensaio, tanto em prismas como em discos, destinados a ensaio destrutivos e não destrutivos. Atendendo a que a pedreira se encontra em lavra suspensa, os blocos encontravam-se acumulados numa zona da exploração e não foi possível definir a que zonas da pedreira as amostras pertencem. Foram seleccionados blocos de dois tipos de amostras: quatro representam o granito fresco e os outros quatro representam o granito alterado.

### 4.1 Preparação das Amostras

As amostras recolhidas na pedreira não tinham nem a forma nem a dimensão requerida pelas normas dos ensaios, pelo que foi necessário cortar os blocos, com uma serra de disco diamantado. Foram cortados prismas de 50 mm x 50 mm x 150 mm, num total de 32 provetes, 16 de granito fresco e 16 de granito alterado, para se poderem efectuar os ensaios não destrutivos e destrutivos. Devido à elevada dureza da rocha, não foi possível obter cilindros por limitações da capacidade da caroteadora. No caso do ensaio brasileiro foi necessário preparar discos, num total de 32 discos com dimensão de 60 mm x 30 mm, com a mesma distribuição acima definida para os prismas (Figura 4.1.1).



Figura 4.1.1: Provetes preparados para o projecto: provetes prismáticos GFTE e GATE, assim como discos GFTE e GATE.

Os provetes e os discos foram medidos com uma craveira digital *PEREL* com capacidade para medir até 200 mm, para assegurar que todos os provetes tinham as medidas definidas acima. Com a

ajuda da balança *METTLER* (modelo PB1502) foi efectuada a pesagem das amostras antes de serem colocadas na estufa a 105°C, durante 3 dias, até obter um peso constante, para que fosse eliminada qualquer humidade presente na rocha. Foram feitas pesagens ao longo desses três dias até que a sua massa estabilizasse, para garantir que toda a água dos poros (conectados e isolados) tinha sido eliminada.

#### **4.1.1 Análise Petrográfica**

A análise petrográfica tem como objectivo fazer uma primeira caracterização da rocha. Foi estudada a mineralogia, a textura, a dimensão do grão, a cor, a fracturação e a alteração. Esta observação compreendeu a análise macroscópica do granito são e do alterado e o estudo ao microscópio óptico de polarização de todas as características referidas. Este estudo foi realizado em quatro lâminas delgadas polidas, preparadas para posteriormente se poderem fazer análises por microsonda electrónica.

Após os provetes serem sujeitos a variação de temperatura, foram produzidas mais quatro lâminas delgadas polidas para analisar, sob o microscópio óptico e na microsonda electrónica, as modificações verificadas nos minerais e na textura, assim como o surgimento de fracturas.

#### **4.1.2 Microsonda Electrónica**

A análise por microsonda electrónica (ME) é uma técnica microanalítica, que permite a análise química quantitativa de um volume mínimo de material. A análise foi realizada num equipamento Jeol JXA-8200 do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

A análise por microsonda electrónica (ME) é uma técnica microanalítica que permite a análise química quantitativa de um volume mínimo de material. As análises foram realizadas no equipamento Jeol JXA-8200 do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Este método utiliza um feixe de electrões que atravessa um conjunto de lentes eletromagnéticas, de modo a ser focado numa área de poucos micra de diâmetro. Como os electrões deste feixe viajam a uma velocidade muito elevada, atingem uma área da amostra com uma dimensão três vezes maior que o diâmetro do feixe, variando o volume de material analisado entre 10 a 20  $\mu\text{m}^3$ . Nesta pequena porção da amostra, os electrões do feixe causam a ejeção de electrões das orbitais electrónicas mais internas dos átomos dos componentes do material analisado, deixando vagas que são então preenchidas por electrões provenientes das orbitas mais externas, ou seja, de maior energia, o que faz com que seja libertada energia através da emissão de raio-X, sendo o comprimento de onda correspondente a essas emissões característico de cada elemento químico (Klein et al., 2002).

As análises químicas quantitativas foram obtidas recorrendo aos 4 espectrómetros de dispersão de comprimentos de onda (WDS), sendo por vezes efectuados alguns reconhecimentos expeditos em modo de dispersão de energias (EDS). As análises obtidas foram sujeitas a correções seguindo o método ZAF e usando padrões adequados para cada elemento determinado

### 4.1.3 Difração de Raio-X (DRX)

Os minerais têm uma estrutura tridimensional ordenada com características bem definidas e conhecidas.

Os raios-X representam uma pequena faixa do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda variáveis entre 100 Å e 0.02 Å, valores estes que enquadram as dimensões das distâncias interplanares na maior parte dos minerais.

Por isso, a radiação-X que atinge um arranjo ordenado tridimensional faz com que os átomos dessa estrutura vibrem com a mesma frequência da radiação X incidente. A energia é parte absorvida pelos electrões que actuam como novas fontes ao reenviar esta energia com a mesma frequência e comprimento de onda. As ondas que interferem construtivamente produzem um efeito de dispersão que é conhecido como difracção (Klein et al., 2002).

Este efeito de dispersão, em que os raios-X são dispersos pelos electrões dos átomos sem mudanças de comprimento de onda, é conhecido como a Lei de Bragg. Esta lei é o fundamento físico da aplicação da difracção de raio-X na determinação de estruturas cristalinas e é descrito pela equação de Bragg:

$$n\lambda = 2d_{hkl} * \text{sen}\theta$$

Assim, um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) está relacionado com os ângulos de difracção obtidos ( $2\theta$ ) e com os espaçamentos interplanares ( $d_{hkl}$ ) no material cristalino estudado.

O difractómetro de raios-X é um equipamento que permite identificar minerais ou outros materiais com estrutura cristalina, através da obtenção de um registo gráfico, cujos picos, correspondentes a valores  $2\theta$  precisos, permitem o cálculo dos de valores relativos a esses espaçamentos interplanares e, desse modo, a identificação do mineral ou minerais em causa.

A amostra usada para identificação por DRX é constituída por um pó fino da amostra original, devidamente compactado. Um detector, ligado a um goniómetro que permite um movimento rotacional de grande amplitude angular em torno da amostra, permite a detecção dos raio-X difractados pela amostra em função do intervalo angular  $2\theta$  percorrido (Klein et al., 2002).

Os impulsos electrónicos assim gerados são amplificados, sendo a altura dos picos registados directamente proporcional à intensidade dos impulsos obtidos por difracção em cada conjunto de planos cristalográficos do material estudado.

## 4.2 Aquecimento / Arrefecimento

O aquecimento das amostras foi feito numa mufla *EHRET MUFFLE FURNACE* (modelo MO L 3; 5; 9;11/ S27) da *Nabertherm* (Figura 4.2.1) com um sistema com capacidade para definir a taxa de aquecimento e a temperatura pretendida para cada ensaio.



Figura 4.2.1: Mufla *EHRET MUFFLE FURNACE* (modelo MO L 3; 5; 9;11/ S27) da *Nabertherm*.

Com o fim de definir a taxa de aquecimento mais adequada, consultaram-se alguns trabalhos sobre curvas paramétricas. De acordo com Zehfuss e Hosser (2006), algumas curvas como a referida na ISO 834, não são representativas do comportamento real de um incêndio uma vez que excluem a fase de declínio do fogo. Estes autores incluíram assim, na sua investigação, variáveis como a geometria dos espaços, as condições de ventilação, entre outras e propuseram uma curva paramétrica adotada pelo Instituto de Materiais de Construção de Braunschweig.

As EN 1991-1-2 de 2008 apresentam um conjunto de procedimentos destinados a avaliar o efeito de um incêndio nos materiais estruturais, fazendo depender esta análise de um conjunto de variáveis que não estão incluídas neste trabalho, pelo que não encontramos qualquer valor padrão para a taxa de aquecimento a aplicar nos ensaios que pretendíamos realizar. Foram objeto de consulta vários trabalhos e concluiu-se que não há um valor padrão para a taxa de aquecimento, nem procedimentos específicos para o arrefecimento (Martinho & Dionísio et al., 2018).

Atendendo a este facto e devido ao constrangimento do equipamento para a geração da rampa de aquecimento das amostras, selecionou-se uma taxa de  $16^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , valor este já utilizado em outros trabalhos (Martinho & Dionísio et al., 2018). A mufla utilizada permite definir a taxa de aquecimento e o tempo em que as amostras estarão expostas (3h) às temperaturas definidas ( $400^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  ou  $600^{\circ}\text{C}$ ), antes de se iniciar o processo de arrefecimento. Assim, foi possível atingir os  $400^{\circ}\text{C}$  em 25 minutos, os  $500^{\circ}\text{C}$  em 31 minutos e os  $600^{\circ}\text{C}$  em 38 minutos.

O arrefecimento das amostras consistiu em deixá-las arrefecer lentamente dentro da mufla até atingirem a temperatura ambiente, o que teve uma duração aproximada de 24 horas, para tentar recriar o melhor possível o cenário da extinção de um fogo por falta de material de combustão.

### 4.3 Determinação da Porosidade Aberta e da Massa Volúmica

A porosidade é uma característica ou parâmetro da rocha que mede a percentagem do volume de poros na rocha. A porosidade pode ser estudada em termos de porosidade aberta e porosidade fechada. A primeira refere-se à fracção do volume de poros que estão conectados entre si e permitem a circulação de fluidos, enquanto a porosidade fechada refere-se ao volume de poros existentes na rocha que não tem qualquer conexão com outros poros e por isso não permitem a circulação de fluidos.

O método para calcular a porosidade foi baseado na norma ISRM, (1972). As amostras seleccionadas têm um peso superior a 50g, como é possível verificar nas Tabelas A3.1 até à A3.4 (em anexo), não tendo sido possível cumprir a recomendação do tamanho mínimo 10x superior ao maior grão na amostra. Como o granito é de grão grosseiro, com grãos com uma dimensão que varia entre 30 e 70 mm, os provetes teriam dimensões demasiado grandes para manuseamento e utilização do equipamento.

As amostras foram medidas e pesadas antes de serem colocadas na mufla, *EHRET MUFFLE FURNACE* (modelo MO L 3; 5; 9;11/ S27) da *Nabertherm*, a 70°C para que toda a humidade presente na rocha evaporasse. Neste período foram feitas duas pesagens para verificar se o peso das amostras tinha estabilizado. Posteriormente as amostras foram arrefecidas no exsiccador, para depois serem colocadas num recipiente a vácuo durante 24 horas. Passado esse tempo adicionou-se água bidestilada até cobrir totalmente todas as amostras e deixaram-se no vácuo durante mais 24 h. No final deste período deixou-se que o recipiente voltasse à pressão atmosférica durante um período de 24 h. Ao retirar as amostras para obter a massa saturada e a submersa foi necessário retirar o excesso de água na superfície com ajuda de papel. Com este processo descrito acima foi possível calcular a massa seca ( $W_s$ ), a massa saturada ( $W_{sat}$ ) e a submersa ( $W_{sub}$ ).

Sabendo que a porosidade é:

$$\eta = \frac{W_{sat}}{W_s - W_{sub}}$$

Em que:

$\eta$  porosidade (%);

$W_{sat}$  massa saturada (g);

$W_s$  massa seca (g);

$W_{sub}$  massa submersa (g);

A massa volúmica é determinada a partir da absorção de água, através do mesmo método que foi utilizado na porosidade aberta.

Sabendo que a massa volúmica é:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$\rho$	massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> );
$M$	massa do corpo (gramas)
$V$	volume do corpo (cm <sup>3</sup> )

#### 4.4 Absorção de água

Este ensaio permite definir qual a capacidade da rocha em absorver água. Os provetes foram previamente secos numa estufa a 60°C durante uma semana para que toda a água fosse eliminada. As amostras foram pesadas e a área que esteve em contacto com a água foi medida. Posteriormente colocaram-se os provetes, dois de cada vez com um intervalo de ( $\pm 17$  min) entre cada par, dentro de um recipiente com uma grelha que permitisse que a coluna de água apenas cobrisse cerca de 3mm da amostra (Figura 4.3.1), para que fosse possível fazer as medições segundo a norma EN 1925 (1999). Para obter de novo a massa retirou-se o provete da água, a superfície que estava submersa foi seca e foi colocado sobre a balança. Fez-se o registo da massa obtida e voltou-se a colocar o provete no recipiente com água. Este procedimento foi acompanhado com um cronómetro para registar ao segundo o momento de cada pesagem.

As medições foram feitas nos seguintes intervalos de tempo: 1, 3, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, com a maior rigor possível para que seguisse a norma referida, que define que sejam feitas medição até aos 1440 min. Neste caso, entre a medição dos 60 min e a dos 1440 min foram feitas medições aleatórias ao longo do tempo para verificar a evolução da absorção de água.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é obtido pelo coeficiente angular da parte inicial do traçado retilíneo da curva, sendo o coeficiente obtido em qualquer ponto através da fórmula:

$$C = \frac{m_i - m_d}{A * \sqrt{t_i}}$$

Em que:

$m_i$	massa inicial (gramas);
$m_d$	massa após imersão (gramas);
$A$	área de contacto (m <sup>2</sup> );
$t_i$	instante em que é feita a pesagem (segundos).



Figura 4.4.1: a) Provetes GATE num recipiente em água com 3 mm de profundidade, no início do ensaio. b) Provetes GATE e GFTE num recipiente em água com 3 mm de profundidade, no final do ensaio.

#### 4.5 Determinação da velocidade das ondas P e S

Este ensaio é muito utilizado para caracterizar o grau de fraturação da rocha. Consiste na determinação da velocidade de propagação das ondas P e S, com a geração de ondas longitudinais e transversais através de um transdutor eletroacústico que é colocado na superfície da amostra.

Este procedimento pode ser feito segundo três métodos (directo, semi-indirecto e indirecto), em que a diferença entre estes métodos é a posição relativa dos transdutores, ou seja, o transmissor e o receptor. O método directo consiste em colocar cada um em face opostas e paralelas, enquanto no método semi-directo o transmissor e o receptor estão em faces perpendiculares e no indirecto ambos são colocados na mesma face lado a lado. Foi usado o osciloscópio *HMO1002 Series* da *ROHDE & SCHWARZ* para fazer as medições da velocidade das ondas e o gerador de impulsos foi o *Function generator 5MHZ* da *BK Precision*, dois pares (um par para medir as ondas P e o segundo para medir as ondas S) de transdutores e um amplificador (Figura 4.5.1).

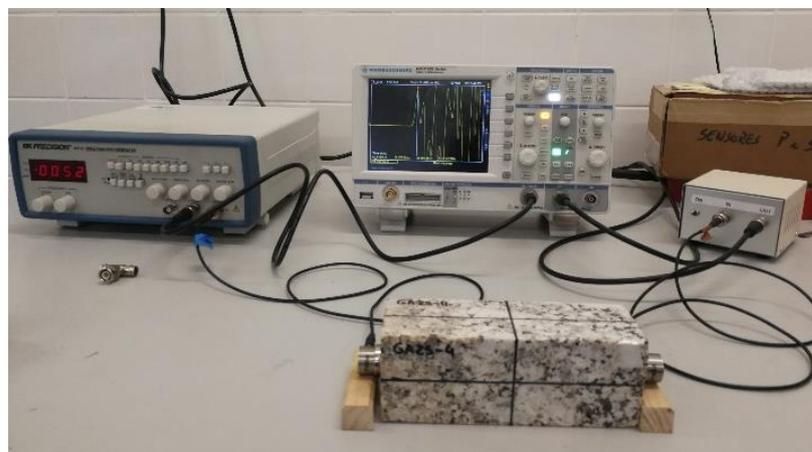


Figura 4.5.1: Utilização do osciloscópio, amplificador e transdutores no método directo da medição da propagação do som.

A equação que permite calcular a velocidade de propagação de ondas é a seguinte:

$$V = \frac{L}{T}$$

Em que:

V velocidade (m/s);

L comprimento (m);

T tempo que é necessário para a onda atravessar a distância entre o emissor e o receptor (milissegundos);

O procedimento selecionado neste método foi o directo segundo a ISRM (1978a), já que as amostras apresentam uma distribuição aleatória dos grãos, embora em alguns casos seja possível observar o alongamento preferencial nos feldspatos.

#### 4.6 Determinação da Resistência à Tracção

O ensaio brasileiro é um método indirecto para determinar a resistência da rocha à tracção.

Segundo a ISRM (1978b) as bases da amostra devem ser lisas e sem irregularidades, para garantir que a força seja aplicada uniformemente na amostra. As laterais da amostra foram lixadas para se retirar qualquer tipo de irregularidade. O diâmetro das amostras tem de ser superior a 54 mm enquanto a espessura deve ser pelo menos superior ao raio correspondente. As mandíbulas adequadas para este ensaio tem de ter no mínimo um raio 1.5x maior que o da amostra e uma largura superior 1.1x ao da amostra. Nas amostras foi colocada uma fita adesiva à volta da sua bordadura para que quando atingisse a rotura não se fragmentasse por completo, tal como recomendado na norma. A carga aplicada nas amostras tem de ser constante para que dentro de 15 a 30 segundos seja atingida a ruptura, por isso a norma recomenda que a carga seja aplicada com um valor de 200 N/s. Os ensaios foram executados na prensa hidráulica *FORM-TEST* modelo *MEGA 10* com a capacidade de carga máxima de 1000kN (Figura 4.6.1).

A equação para o cálculo da resistência à tracção é:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt}$$

Em que:

$\sigma_t$  resistência à tracção (MPa);

P força normal máxima aplicada (N);

t espessura da amostra (mm);

D diâmetro da amostra (mm);



Figura 4.6.1: Prensa hidráulica com um provete de GFTE, em disco, para efectuar o ensaio brasileiro (tração).

#### 4.7 Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial e da Deformabilidade

A resistência à compressão corresponde ao valor da força máxima de compressão aplicada numa determinada área num ensaio de compressão uniaxial executado de acordo com os procedimentos da ISRM (1979).

Os provetes ensaiados são prismas de 150 mm x 50 mm x 50 mm. Todavia, devido à textura porfiróide da rocha não foi possível respeitar as dimensões mínimas requeridas na norma, dado que a base teria de ser 10 vezes superior ao maior grão, o que iria inviabilizar o estudo já que a dimensão do grão varia entre 30 e 70 mm.

Para a determinação do módulo de deformabilidade colocaram-se extensómetros no centro das faces laterais opostas de cada provete. Foram colocados dois tipos de extensómetros, uns com 30 mm para medir a deformação vertical e outros com 20 mm para medir a deformação horizontal. A escolha de dois tipos de extensómetros deveu-se ao facto de o provete ter uma largura de apenas 50 mm, logo os extensómetros de 20 mm são suficientes, segundo a norma, para medirem com precisão a deformação acomodada pela rocha. Utilizaram-se dois provetes como compensadores, com extensómetros iguais aos montados. Os extensómetros dos provetes analisados e dos compensadores foram ligados ao *datataker (Model P3 Strain Indicator and Recorder)* para fazer a leitura referente às extensões para os patamares de carga definidos, com erro de leitura de  $1 \times 10^{-6}$  (Figura 4.7.1). Os ensaios contemplam 3 ciclos de carga e descarga em que se define o valor máximo a aplicar. Para definir este valor máximo foi necessário fazer um ensaio inicial levando os provetes à rotura. Os valores utilizados nos ciclos de carga máxima foram determinados partindo do pressuposto que se verifica comportamento elástico até 50% da resistência à compressão uniaxial para a rocha. Assim para o granito fresco (GFTE) foi definido o valor máximo de 60 kN e para o granito alterado (GATE) o valor de 45 kN. Fez-se o registo dos valores obtidos nos extensómetros para escalões de carga de 5 kN até ser atingido o valor máximo

estabelecido acima indicado. O primeiro ciclo de carga não é considerado para a determinação dos parâmetros de deformabilidade por se considerarem que pode observar-se alguma excentricidade na aplicação da carga. A velocidade de carregamento foi de 2.25 kN/s.

A resistência da rocha à compressão uniaxial é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Em que:

$\sigma$  resistência à compressão (Pa);

P carga máxima (N);

A área da secção (m<sup>2</sup>).



Figura 4.7.1: Provete GFTE na prensa hidráulica preparado para o ensaio de compressão uniaxial.

O módulo de elasticidade é determinado pela seguinte equação:

$$\sigma = E\varepsilon$$

E módulo de Young

$\varepsilon$  deformação

Se antes do momento de rotura a deformação for linear com o aumento da tensão, então este comportamento é elástico linear (Jaeger et al., 2006).

Caso a variação da deformação com a tensão dos materiais elásticos não seja a mesma na carga e na descarga (Jaeger et al., 2006), o comportamento observado é elástico não linear. Nestes casos, para materiais elásticos não lineares, o declive da recta de deformação-tensão é determinado pelo método secante. Este método consiste no cálculo do módulo de elasticidade através da equação (Jaeger et al., 2006):

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Os intervalos adoptados para o cálculo deste declive foram  $1/3 \sigma_c$  e  $1/2$  de  $\sigma_c$ .

A rocha sob compressão uniaxial não se deforma apenas na direcção da aplicação da carga, mas também nas direcções perpendiculares. A razão negativa entre a deformação transversal e longitudinal, é conhecida como coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Para uma rocha com comportamento elástico linear, este parâmetro varia entre 0 e 0.5.

Os parâmetros de deformabilidade podem ser também obtidos a partir do ensaio de velocidade de propagação das ondas acústicas, obtendo-se de forma dinâmica, ou seja, módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) e o coeficiente de Poisson dinâmico ( $\nu_d$ ) e são calculados com o recurso às velocidades das ondas P e S ( $V_p$  e  $V_s$ ), com as seguintes fórmulas (Yang et al., 2017):

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]} \quad E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

- $\nu_d$  coeficiente de Poisson;
- $E_d$  módulo de elasticidade dinâmico;
- $V_p$  velocidade de propagação das ondas P (m/s);
- $V_s$  velocidade de propagação das ondas S (m/s);
- $\rho$  massa volúmica ( $\text{g/cm}^3$ ).

## 4.8 Cor

O granito em estudo tem uma textura porfiróide, o que faz com que seja muito heterogéneo em termos de cor, por isso foi necessário fazer 12 medições por amostra para homogeneizar os dados recolhidos. As medições foram efectuadas apenas nas faces alongadas, sendo em cada uma delas realizadas quatro leituras. Foram analisados os 22 provetes que serão expostos às temperaturas definidas (X, Y) para se ter uma base de dados de comparação com as medições que serão feitas posteriormente. Os registos foram feitos com equipamento *Minolta CHROMA METER CR-400* com o padrão de iluminação  $D_{65}$  ( $Y_{85.5}$ ,  $X_{0.3185}$ ,  $Y_{0.3356}$ ), com uma luz de xénon com diâmetro de 8 mm e com um ângulo de incidência de  $0^\circ$ .

## 5. Resultados

### 5.1 Análise Petrográfica

#### 5.1.1 Observação macro e microscópica

O granito seleccionado para este estudo é um granito bastante heterogéneo no que se refere à dimensão do grão. É uma rocha com uma granularidade média a grosseira, com megacristais de feldspato que por vezes ultrapassam os 50 mm de comprimento. A maioria dos grãos parece não ter uma orientação definida, excepto os megacristais de feldspato que em certas zonas da frente de exploração da pedreira apresentam uma orientação subvertical. Na pedreira observam-se zonas de granito fresco, de cor cinzento-azulada, que predominam, e a área de granito alterado, de tonalidade amarelada. As amostras correspondem a estas duas zonas, de modo a analisar a influência do grau de alteração das propriedades físicas e mecânicas que vão ser determinadas após submeter os provetes a diferentes temperaturas.

Os provetes de cada amostra têm as tonalidades observadas na pedreira e mostram textura fanerítica inequigranular, com megacristais subédricos de feldspato. O granito alterado apresenta os cristais de feldspato amarelados e tonalidade alaranjada junto aos cristais de biotite.

A observação ao microscópio óptico de polarização mostra uma textura hipidiomórfica inequigranular com uma matriz média a grosseira, em que os minerais apresentam dimensões variáveis.

A rocha é constituída predominantemente por quartzo, plagióclase, feldspato potássico e biotite, com teor inferior de moscovite e, como minerais acessórios contém apatite, minerais opacos, ilmenite e zircão.

Os cristais mais desenvolvidos da matriz são formados por feldspato potássico e por plagióclase. Os cristais de feldspato potássico (a ortóclase é mais comum do que microclina) têm forma anédricas e são em geral prismáticos. São frequentemente pertíticos e, por vezes, mostram albitização. Contêm abundantes inclusões de plagióclase e, no granito alterado, mostram argilização mais intensa do que no granito fresco.

A plagióclase forma cristais de dimensões muito variáveis, ocorrendo em grão desenvolvidos, de hábito subédrico, grãos da dimensão média da matriz, subédricos, tabulares e pequenas inclusões euédricas nos cristais mais desenvolvidos de feldspato potássico. Os cristais são fortemente zonados e estão alterados para sericite e, mais raramente, para calcite. Em alguns cristais formam-se lamelas de moscovite. A alteração é mais intensa no núcleo dos cristais, em especial na amostra de granito alterado. Os cristais de plagióclase apresentam-se sempre mais alterados do que os de feldspato potássico, em qualquer das amostras.

A alteração é também mais intensa nos cristais de feldspato de maior dimensão, o que faz com que a maioria dos megacristais tenha indícios de alteração com nítida argilização.

O quartzo forma cristais anédricos, de bordos suturados e apresenta extinção ondulante. Os cristais formam frequentemente aglomerados.

As lamelas de biotite têm também dimensões variáveis. Contêm abundantes inclusões de minerais opacos e de apatite e estão por vezes parcialmente cloritizadas, em especial no granito alterado. A moscovite é muito menos abundante do que a biotite, os cristais são anédricos, de menor dimensão do que os de biotite aos quais ocorrem por vezes espacialmente associados.

Observam-se algumas fracturas que atravessam predominantemente os cristais de quartzo (Figura 5.1.1.1). As fracturas são essencialmente intragranulares e têm espessuras variáveis, frequentemente sem preenchimento. Algumas mostram preenchimento por carbonatos.

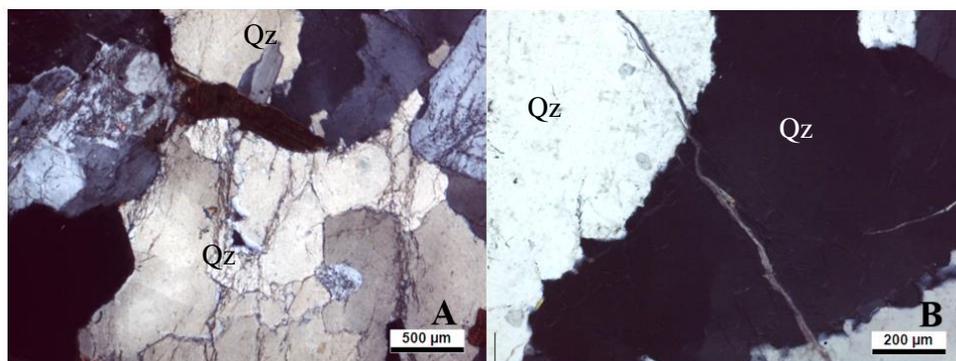


Figura 5.1.1.1:Fracturas na amostra GFTE, cortando cristais de quartzo, por vezes preenchidas por carbonatos (imagens em NX).

A fracturação é mais evidente na amostra de granito alterado dado que as fracturas estão bordeadas por óxidos e, por vezes, aparentam conter filossilicatos, não discerníveis à escala de observação (Figura 5.1.1.2). Têm geralmente espessura e extensão reduzidas.

Observam-se também fracturas que acompanham o contacto entre os grãos (fracturas intergranulares), que constituem superfícies preferenciais para o alastramento e criação de novas fracturas, quando a rocha é submetida a aquecimento. No granito fresco a proporção de fracturas é ligeiramente menor assim como a sua extensão relativamente às fracturas no granito alterado.

O aquecimento dos provetes às diferentes temperaturas de ensaio (400°C, 500°C e 600°C) originou algumas alterações em ambas as amostras.

À temperatura de 400°C foram geradas novas fracturas em ambas as amostras. Na amostra GATE a maioria das fracturas mostrou preenchimento. As fracturas tendem a aumentar em espessura e extensão, acompanhadas pelo crescimento do material que as preenche (Figura 5.1.1.3). No caso de GFTE algumas fracturas encontram-se preenchidas por um material que aparenta ser um carbonato. No GATE o produto que preenche as fracturas mancha os minerais à sua volta, com maior incidência nos feldspatos e no quartzo, o que não é visível nas biotites (Figura 5.1.1.3-D), as quais ganham orlas que rodeiam os cristais.

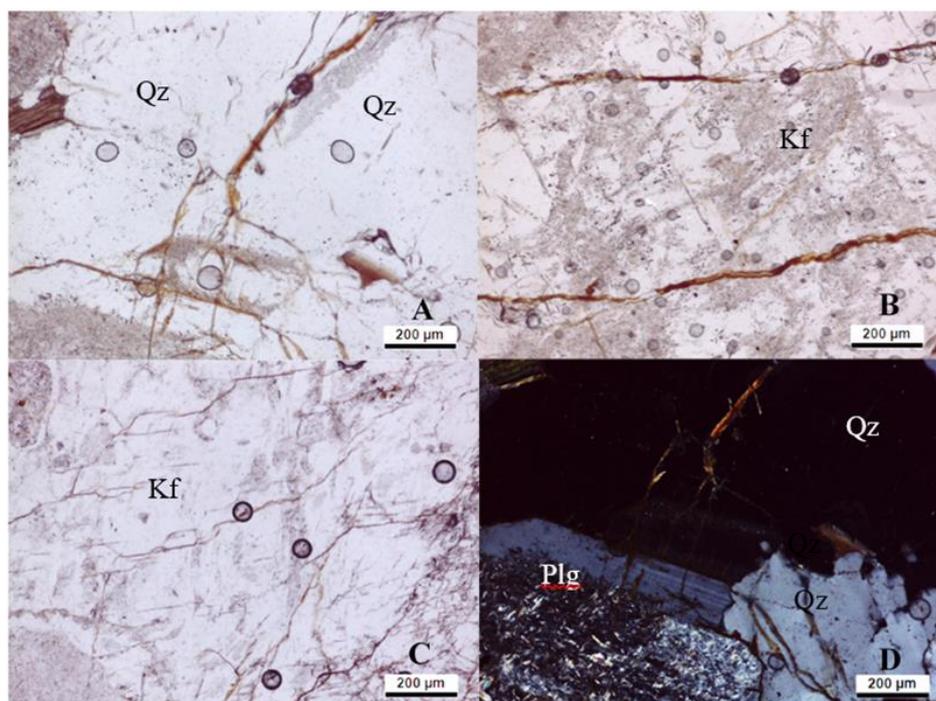


Figura 5.1.1.2: Fraturas na amostra GATE preenchidas por óxidos, atravessando cristais de quartzo e feldspato. Observa-se também a alteração intensa de um cristal de plagioclase (imagens A, B e C em N//; imagem D em NX).

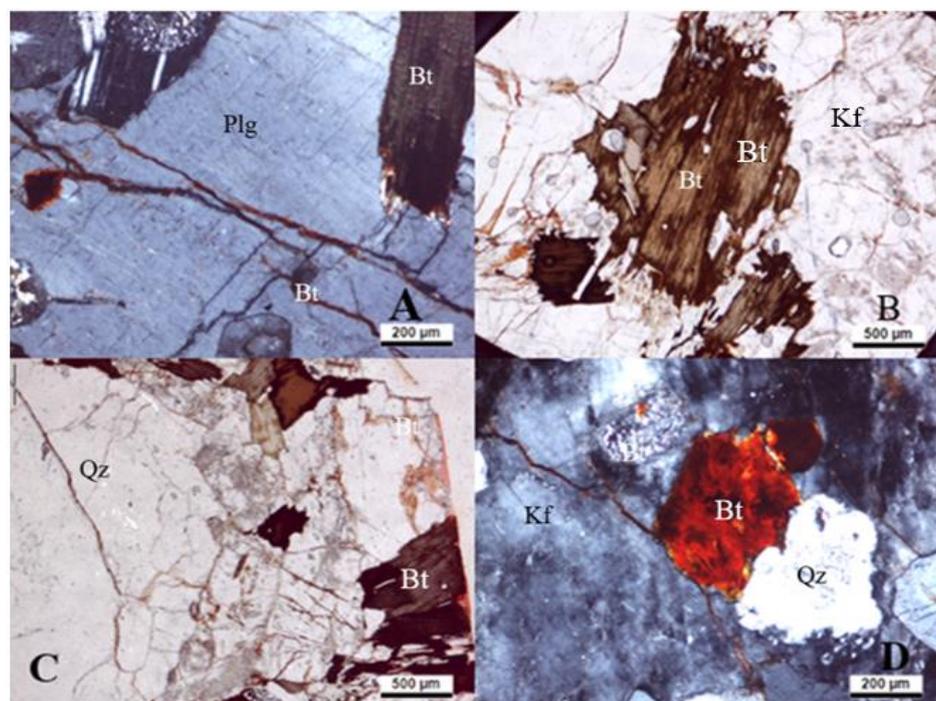


Figura 5.1.1.3: Alterações provocadas pelo aquecimento da amostra GATE a 400°C: A- Fractura preenchida por óxidos e filossilicatos (?); B e C – Cristal de biotite mostrando uma orla negra; D- Fractura preenchida e biotite substituída pelo mesmo material que preenche a fractura (imagens B e C em N//; imagens A e D em NX).

A criação de orlas negras nos cristais de biotite pode ser observada na Figura 5.1.1.3-B, C, D, que, embora ocorra em ambas as amostras, tem maior expressão no GATE do que no GFTE.

O aquecimento dos provetes a 500°C teve o mesmo efeito que tinha sucedido na temperatura anterior, mas com uma maior intensidade de fracturação. Na amostra GATE, que manifestou maior impacto pelo efeito do aumento da temperatura, as fracturas mostraram um incremento da sua espessura e extensão (Figura 5.1.1.4). O preenchimento é também mais espesso, acompanhando a expansão das fracturas. As fracturas mostram-se também mais abertas, criando espaços abertos e aumento da porosidade, o que não havia acontecido aos 400°C.

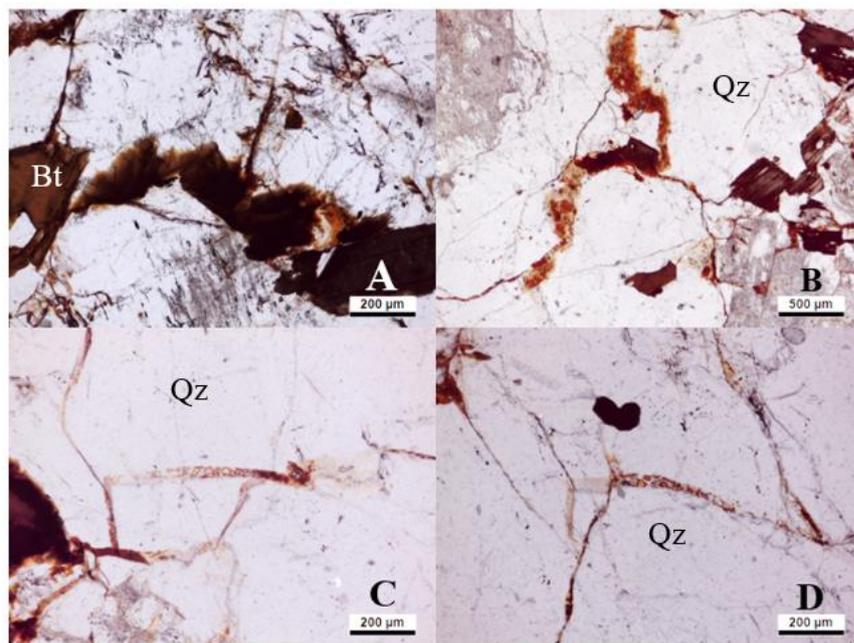


Figura 5.1.1.4: Alterações provocadas pelo aquecimento da amostra GATE a 500°C: A e B - Biotites após aquecimento com uma orla negra no bordo do grão; B, C e D- Fractura preenchida por óxidos e filossilicatos (?) (todas as imagens em N//).

Nas Figuras 5.1.1.4.B-D é notório que o preenchimento das fracturas começa a manchar o próprio grão com pequenas secções do mineral a serem cobertas pelos óxidos de ferro. As biotites apresentam as orlas negras na bordadura do grão, mas também é criada uma bordadura à volta dos grãos de quartzo que provém das fracturas preenchidas por óxidos.

À temperatura de 600°C, os danos provocados pelo aquecimento são bastante evidentes tanto em observação microscópica como à vista desarmada. Na Figura 5.1.1.5.A-B observam-se as orlas negras no bordo da biotite que, a esta temperatura, tendem a ocupar a maioria do grão (Figura 5.1.1.5.A), ocorrendo também descoloração do interior dos cristais, como é possível observar na Figura 5.1.1.5.B.

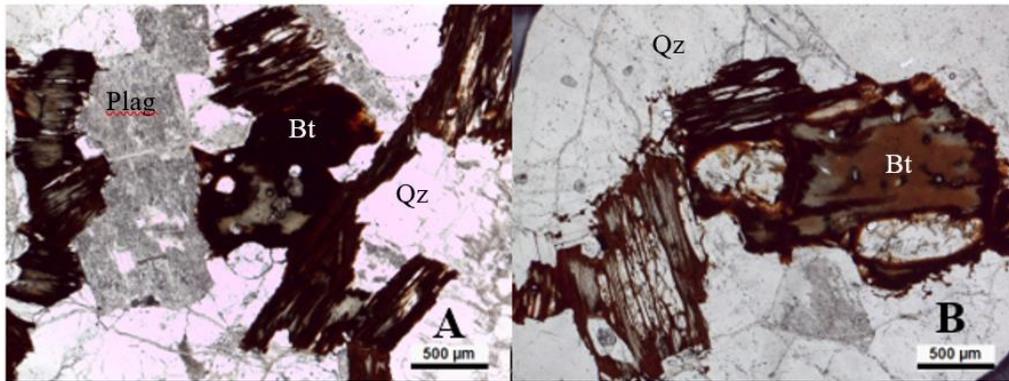


Figura 5.1.1.5: Alterações provocadas pelo aquecimento da amostra GFTE a 600°C: A e B – Biotites com orlas negras na bordadura do grão (imagens em N//).

A observação macroscópica da amostra GFTE após aquecimento revelou que nos megacristais de feldspato existem veios preenchidos por um material escuro e brilhante, com características semelhantes, a esta escala, a uma mica (Figura 5.1.1.6).

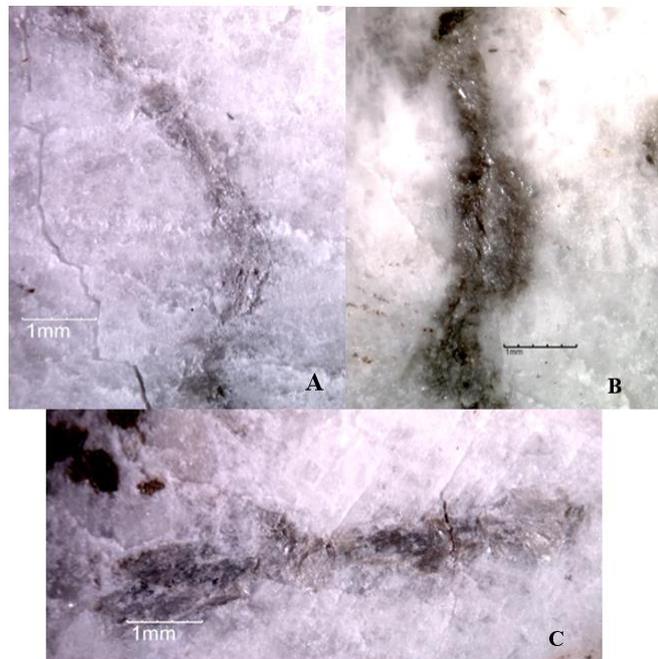


Figura 5.1.1.6: Veio preenchido por um material semelhante a uma mica atravessando um cristal de feldspato potássico.

Estes veios não eram visíveis nos provetes do GFTE à temperatura de 25°C. Apenas com o aquecimento, mesmo à temperatura mais baixa, foi possível identificar vários veios a cortarem os megacristais de feldspato. Quando analisados ao microscópio óptico verificou-se que os veios são preenchidos por carbonatos, como mostram as imagens na Figura 5.1.1.7.A e B. A Figura 5.1.1.7.B mostra como a fractura é completamente preenchida pelo carbonato, o que não acontece em todas as fracturas. As fracturas à temperatura ambiente mostravam espessura e extensão muito reduzidas, sendo difícil identificar qual seria o mineral que as preenchia, tal sendo possível apenas após o aquecimento a 600°C.

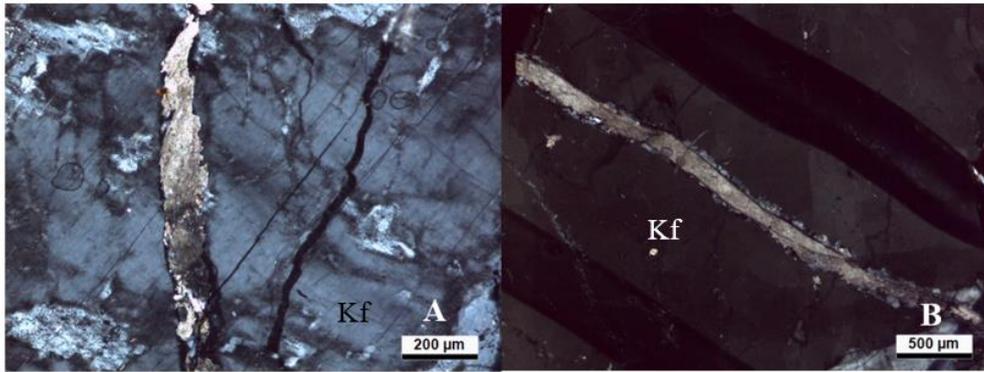


Figura 5.1.1.7: A- Fracturas preenchidas por carbonatos na amostra GFTE (imagens em NX).

A amostra GATE ficou bastante danificada após o aquecimento a 600°C (Figura 5.1.1.8). Ao analisar microscopicamente o GATE confirma-se a observação macroscópica. Todos os grãos mostram fracturas e a maioria dos contactos entre grãos encontra-se fracturada. As biotites têm toda a orla negra nos bordos dos cristais e na maioria a orla cobre parcial ou totalmente o grão. As fracturas com preenchimento sofreram um incremento a esta temperatura, mas este não acompanhou a expansão e por isso a porosidade aumentou drasticamente, como se pode verificar no capítulo 5.2.

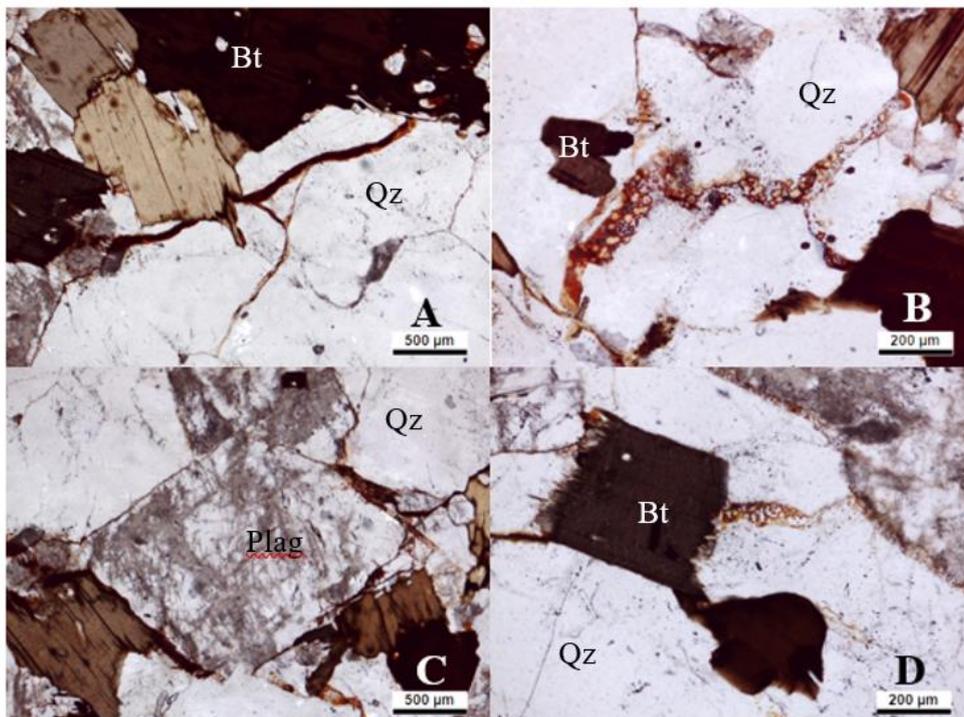


Figura 5.1.1.8: Amostra GATE após aquecimento a 600°C. A- Fractura preenchida por óxidos e filossilicatos (?) e cristais de biotite com a orla negra a cobrir praticamente o grão. B- Mancha de óxidos a cobrir os bordos de grãos de quartzo, fracturas preenchidas pela óxidos e biotites alteradas pela temperatura. C- Grão de feldspato bastante alterado em que as fracturas contornam o grão e estão parcialmente preenchidas por óxidos. D- Biotites alteradas pela temperatura e óxidos a envolverem o cristal assim como as fracturas existentes (todas as imagens em N//).

### 5.1.2 Microsonda electrónica

As observações feitas no microscópio óptico permitem fazer uma análise da mineralogia e da textura da rocha. A sua realização tinha como objectivo analisar as diferenças que ocorrem na rocha por exposição a temperatura elevada, comparando as fracturas que o granito exibia à temperatura ambiente como as que se desenvolveram por aquecimento, e também identificar os minerais que compõem a rocha.

A utilização da microsonda electrónica teve como objectivo analisar os minerais identificados no microscópio óptico para assim confirmar a sua composição e definir a paragénese mineral, mas principalmente analisar o material que preenche as fracturas nas duas amostras, já que a resolução do microscópio óptico não foi suficiente para a sua identificação.

Foram analisadas as lâminas das amostras GFTE e GATE que representam a temperatura ambiente para que se pudessem ser uma referência para comparação com as amostras que foram sujeitas às temperaturas aplicadas neste trabalho. Nas Tabelas 5.1.2.1 a 5.1.2.6 apresentam-se as composições dos minerais obtidas à microsonda.

Tabela 5.1.2.1: Composição química dos minerais da amostra GFTE analisados à microsonda.

GFTE a 25°C (valor médio)	
Minerais	Composição Química
Albite	$\text{Na}_{0.95}(\text{Si}_{3.10}, \text{Al}_{0.84}, \text{O}_8)$
Ortoclase	$\text{K}_{0.95}(\text{Si}_{3.00}, \text{Al}_{0.97}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Biotite	$\text{K}_{0.91}(\text{Fe}_{1.41}, \text{Mg}_{1.37}, \text{Ti}_{0.15}, \text{Al}_{0.09}) (\text{Si}_{2.60}, \text{Al}_{1.1.40}, \text{O}_{10})\text{OH}_2$
Ilmenite	$(\text{Fe}_{0.88}, \text{Mn}_{0.08}) \text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.65} (\text{PO}_4)_{2.80} \text{F}_{0.76}$

Na Tabela 5.1.2.1 é possível verificar que a paragénese mineral da amostra GFTE corresponde a: Quartzo + Ortoclase + Albite + Biotite + Moscovite ± Ilmenite ± Apatite. A amostra GATE apenas sofreu processos de meteorização e mostra paragénese semelhante. A paragénese mineral do GATE é constituída por (Tabela 5.1.2.2): Quartzo + Ortoclase + Plagioclase + Biotite ± Ilmenite ± Apatite.

Tabela 5.1.2.2: Composição química dos minerais da amostra GATE analisados à microsonda.

<b>GATE a 25°C (valor médio)</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Composição Química</b>
Albite	$\text{Na}_{0.89}(\text{Si}_{2.83}, \text{Al}_{1.22}, \text{O}_8)$
Oligoclase	$\text{Na}_{0.80}\text{Ca}_{0.15}(\text{Si}_{2.74}, \text{Al}_{1.31}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Biotite	$\text{K}_{0.96}(\text{Fe}^{+2}_{1.49}, \text{Mg}_{0.76}, \text{Al}_{0.38}, \text{Ti}_{0.15}) (\text{Si}_{2.73}, \text{Al}_{1.27}, \text{O}_{10}) \text{OH}_2$
Ilmenite	$(\text{Fe}_{0.87}, \text{Mn}_{0.07}) \text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.66}(\text{PO}_4)_{2.90} \text{F}_{0.84}$

Os provetes que foram sujeitos às três temperaturas de ensaio (400°C, 500°C e 600°C) também foram analisados à microsonda, para identificar as alterações mineralógicas que ocorreram às várias temperaturas. A amostra GATE foi analisada para as três temperaturas enquanto a GFTE foi apenas analisada à temperatura de 600°C. Apresentam-se os resultados na Tabelas 5.1.2.3 a 5.1.2.6.  $\text{Fe}^{+2}$  para  $\text{Fe}^{+3}$ .

Tabela 5.1.2.3: Composição química dos minerais da amostra GATE após aquecimento a 400°C.

<b>GATE a 400°C (valor médio)</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Composição Química</b>
Albite	$\text{Na}_{0.85}(\text{Si}_{2.80}, \text{Al}_{1.25}, \text{O}_8)$
Biotite	$\text{K}_{0.88}(\text{Fe}^{3+}_{1.45}, \text{Mg}_{0.67}, \text{Ti}_{0.15}, \text{Al}_{0.09}) (\text{Si}_{2.51}, \text{Al}_{1.49}, \text{O}_{10}) \text{OH}_2$
Ortoclase	$(\text{K}_{0.93}, \text{Na}_{0.05}) (\text{Si}_{2.90}, \text{Al}_{1.14}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Ilmenite	$(\text{Fe}_{0.88}, \text{Mn}_{0.08}) \text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.87}(\text{PO}_4)_{2.98} \text{F}_{0.84}$

As análises realizadas na amostra GATE a 400°C e 500°C não revelaram qualquer alteração química nos minerais, excepto a oxidação do ferro ferroso para ferro férrico na biotite, cujos cálculos foram baseados no estudo de Sanz et al. (1983), que refere que à temperatura de 400°C cerca de 25% da quantidade total de ferro na biotite é  $\text{Fe}^{3+}$ , enquanto a 500°C aumenta para cerca de 50%.

Tabela 5.1.2.4: Composição química dos minerais da amostra GATE após o aquecimento a 500°C.

<b>GATE a 500°C (valor médio)</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Composição Química</b>
Albite	$\text{Na}_{0.99}(\text{Si}_{3.11}, \text{Al}_{0.84}, \text{O}_8)$
Oligoclase	$\text{Na}_{0.76} \text{Ca}_{0.23} (\text{Si}_{2.90}, \text{Al}_{1.03}, \text{O}_8)$
Ortoclase	$\text{K}_{0.89} (\text{Si}_{2.89}, \text{Al}_{1.13}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Biotite	$\text{K}_{0.87}(\text{Fe}^{3+}_{1.46}, \text{Mg}_{0.66}, \text{Ti}_{0.15}, \text{Al}_{0.06}) (\text{Si}_{2.52}, \text{Al}_{1.48}, \text{O}_{10}) \text{OH}_2$
Ilmenite	$(\text{Fe}_{0.87}, \text{Mn}_{0.09}) \text{Ti}_{1.01}\text{O}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.83}(\text{PO}_4)_{2.99} \text{F}_{0.82}$

A análise do granito submetido à temperatura de 600°C (Tabelas 5.1.2.5 e 5.1.2.6) mostra que a maioria dos minerais não sofreu qualquer alteração química na sua estrutura, com exceção da biotite. Este mineral regista uma perda de potássio na estrutura, que na amostra GATE é menor que em GFTE, na qual perde quase todo o potássio. Ao perder este elemento perde a sua estrutura cristalina e deixa de ser considerada uma biotite ou um mineral. Ocorre também a oxidação da biotite, o que faz com que o ferro ferroso se torne em ferro férrico. Segundo Sanz et al. (1983) a partir dos 400°C dá-se a oxidação total do ferro ferroso para ferro férrico.

Tabela 5.1.2.5: Composição química dos minerais da amostra GATE após o aquecimento a 600°C.

<b>GATE a 600°C (valor médio)</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Composição Química</b>
Albite	$\text{Na}_{0.92}(\text{Si}_{2.90}, \text{Al}_{1.14}, \text{O}_8)$
Oligoclase	$\text{Na}_{0.72} \text{Ca}_{0.20} (\text{Si}_{2.70}, \text{Al}_{1.35}, \text{O}_8)$
Ortoclase	$\text{K}_{0.90} (\text{Si}_{2.89}, \text{Al}_{1.14}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Biotite	$\text{K}_{0.89}(\text{Fe}^{3+}_{1.49}, \text{Mg}_{0.67}, \text{Al}_{0.16}, \text{Ti}_{0.04}) (\text{Si}_{2.58}, \text{Al}_{1.42} \text{O}_{10}) \text{OH}_2$
Ilmenite	$(\text{Fe}_{0.84}, \text{Mn}_{0.12}) \text{Ti}_{1.01} \text{O}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.70} (\text{PO}_4)_{2.89} \text{F}_{0.76}$

Tabela 5.1.2.6: Composição química dos minerais da amostra GFTE após aquecimento a 600°C.

<b>GFTE a 600°C (valor médio)</b>	
<b>Minerais</b>	<b>Composição Química</b>
Albite	$\text{Na}_{0.93}(\text{Si}_{2.90}, \text{Al}_{1.14}, \text{O}_8)$
Ortoclase	$\text{K}_{0.96} (\text{Si}_{2.90}, \text{Al}_{1.14}, \text{O}_8)$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Calcite	$\text{Ca}_{0.88} \text{CO}_3$
Apatite	$\text{Ca}_{4.65} (\text{PO}_4)_{2.89} \text{F}_{0.67}$

Os óxidos de ferro e os possíveis filossilicatos que preenchem as fracturas da amostra GATE foram analisados à microsonda para as três temperaturas aplicadas. À temperatura ambiente a sua dimensão é inferior ao feixe de análise da microsonda, pelo que os resultados não são conclusivos. No entanto, com o aquecimento houve um aumento da espessura das fracturas e do preenchimento, sendo possível fazer análises, nas várias temperaturas, com o objectivo de identificar a composição química e definir a composição mineralógica.

A análise do preenchimento das fracturas foi feita de duas formas, de modo pontual e em mapa de elementos, que dá a informação de quais os elementos maioritários que compõe a área em análise. A Figura 5.1.2.1 mostra uma fractura que atravessa um grão de quartzo sendo o preenchimento composto por Al, Fe e Si. O silício não ocorre tão evidenciado, no produto de preenchimento, porque a quantidade

de Si é muito maior no quartzo que o rodeia. A análise pontual revela, no entanto, que o preenchimento também contém silício. Esta análise não foi conclusiva dado que a composição obtida não é compatível com a estequiometria ou a estrutura de qualquer mineral conhecido.

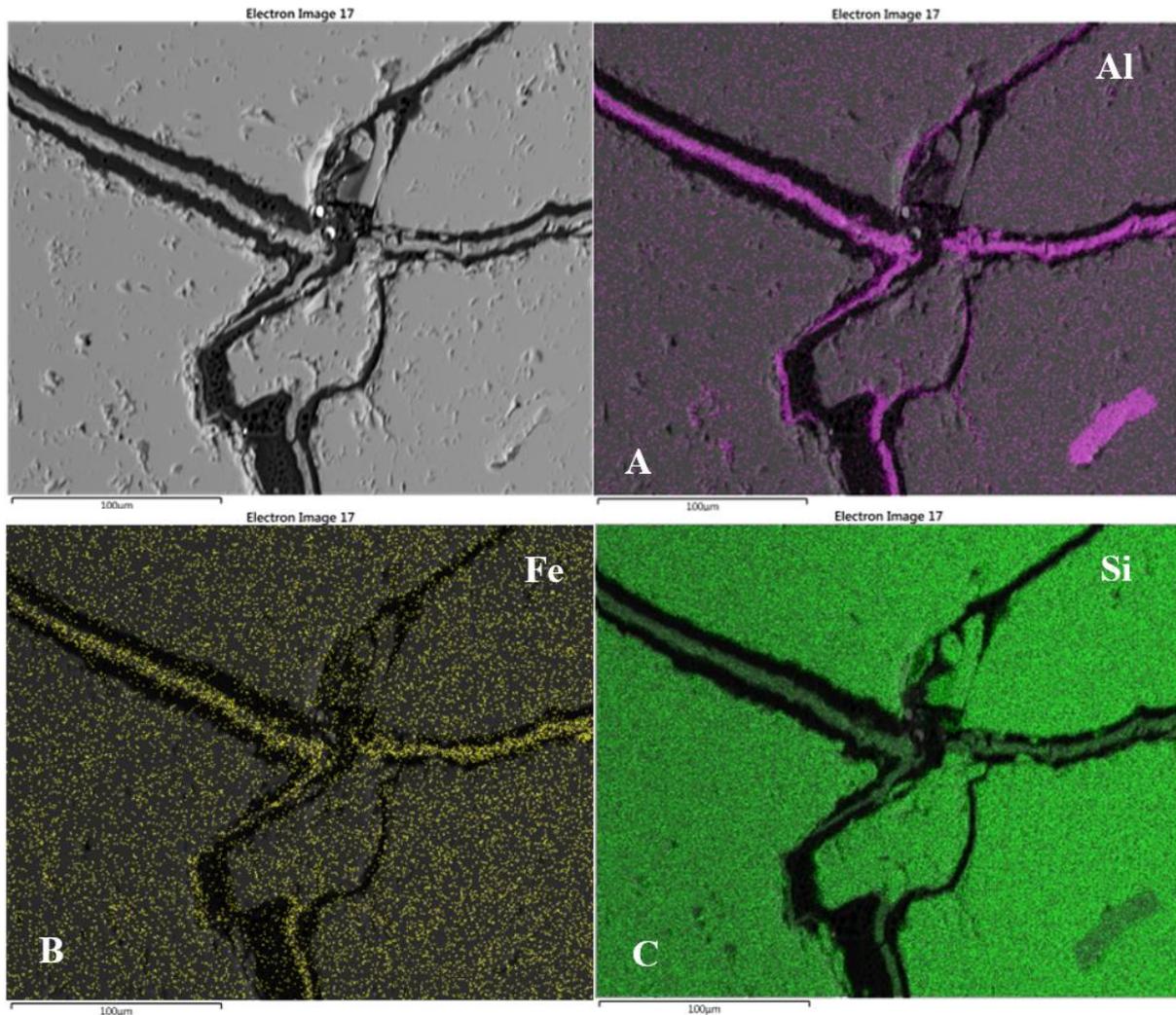


Figura 5.1.2.1: Fractura com preenchimento na amostra GATE, a 500°C. Mapa de elementos obtido à ME. Preenchimentos composto maioritariamente por Al, Fe e Si. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Al em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Si em evidência.

À temperatura de 600°C tanto a dimensão das fracturas como a espessura do preenchimento são muito maiores do que às outras temperaturas testadas, tendo sido realizada análise pontual e mapa de elementos com o objectivo de determinar a composição do preenchimento. A Figura 5.1.2.2 mostra uma fractura preenchida por uma massa que, quando observada ao microscópio ótico, foi definida como uma mistura de óxidos e filossilicatos. No entanto, o estudo à microsonda revela que não é possível observar qualquer estrutura compatível com um filossilicato. O mapa químico mostra que o preenchimento é composto pelos elementos Al, Fe, Mg e Si. Na Figura 5.1.2.2 apenas estão evidenciados os elementos Al, Fe e Mg porque o Si apresenta um teor muito baixo relativamente ao mineral circundante (quartzo).

As várias análises pontuais que foram feitas nesta fractura revelaram de novo resultados inconclusivos, uma vez que não houve compatibilização entre os resultados obtidos e a estequiometria de qualquer mineral conhecido.

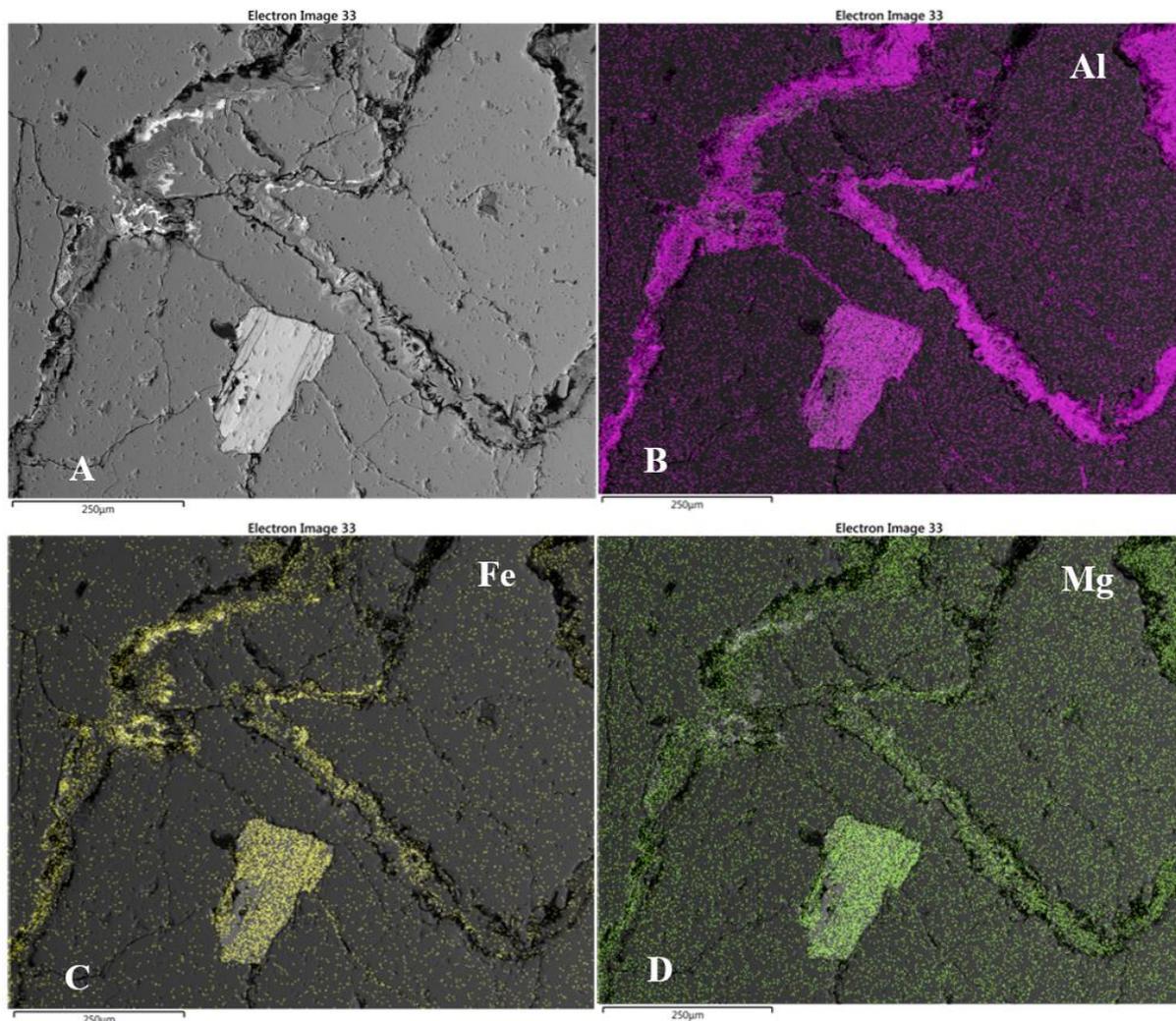


Figura 5.1.2.2: Fractura com preenchimento na amostra GATE, a 600°C. Mapa de elementos obtido à ME. Preenchimento composto maioritariamente por Al, Fe e Mg. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Al em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Mg em evidência.

Na amostra GFTE o preenchimento das fracturas é diferente do observado na amostra GATE e fez-se igualmente análise pontual e mapas de elementos.

Não foi possível identificar em análise microscópica a composição dos veios escuros que atravessam os megacristais de feldspatos. Como mostra a Figura 5.1.2.3 os pequenos veios que se formam com o aquecimento das amostras são compostos por C e Ca, não tendo qualquer vestígio de Al ou Si. Com esta análise geral do mapa químico depreende-se que o mineral que compõe estes veios pertence ao grupo dos carbonatos. Para identificar o tipo de carbonato que compõe o veio foi preciso recorrer à análise pontual, que permitiu assim identificar a calcite como sendo o mineral que constitui

os veios que surgem com o aquecimento nos feldspatos e também o mineral que compõe o preenchimento das fracturas na amostra GFTE.

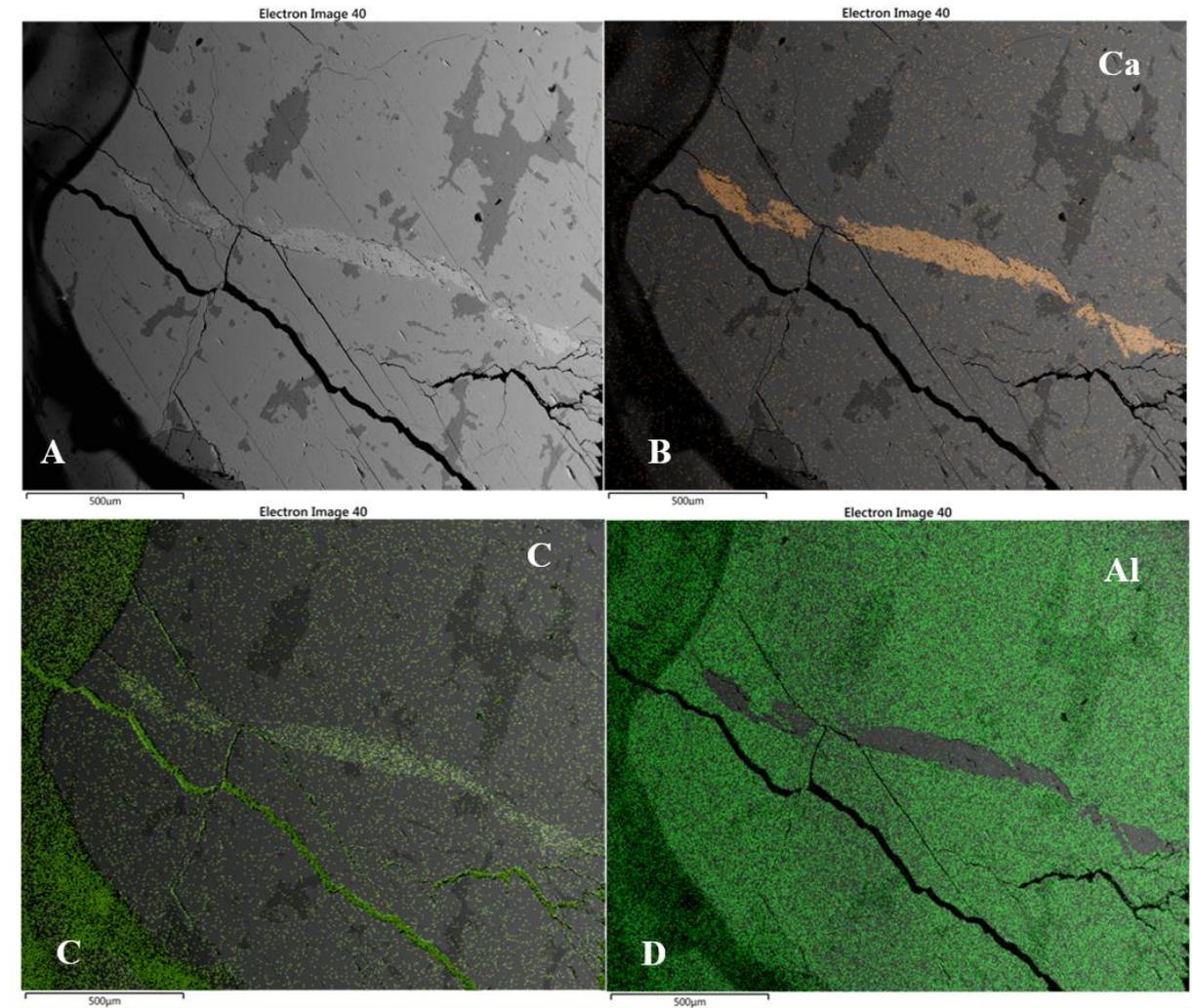


Figura 5.1.2.3: Mapa de elementos obtido à ME. Fractura com preenchimento composto maioritariamente por Ca, C e Al.

A- Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento Ca em evidência; C- Imagem apenas com elemento C em evidência (nota: na fractura à esquerda do veio o carbono deve-se à existência da resina de preparação da lâmina delgada) ;

D- Imagem apenas com elemento Al em evidência.

Os cristais de biotite foram analisados à microsonda para definir a variação de composição com a temperatura e também para analisar as orlas negras na bordadura dos cristais que surgem com o incremento da temperatura. A observação dos mapas de elementos representados na Figura 5.1.2.4 mostra que as orlas negras são caracterizadas pela ausência de potássio na secção mineral da biotite (Figura 5.1.2.4B). Verifica-se também que o Fe, Si, Mg e Al permanecem nos cristais, embora possa haver variações composicionais destes elementos dentro da estrutura da biotite.

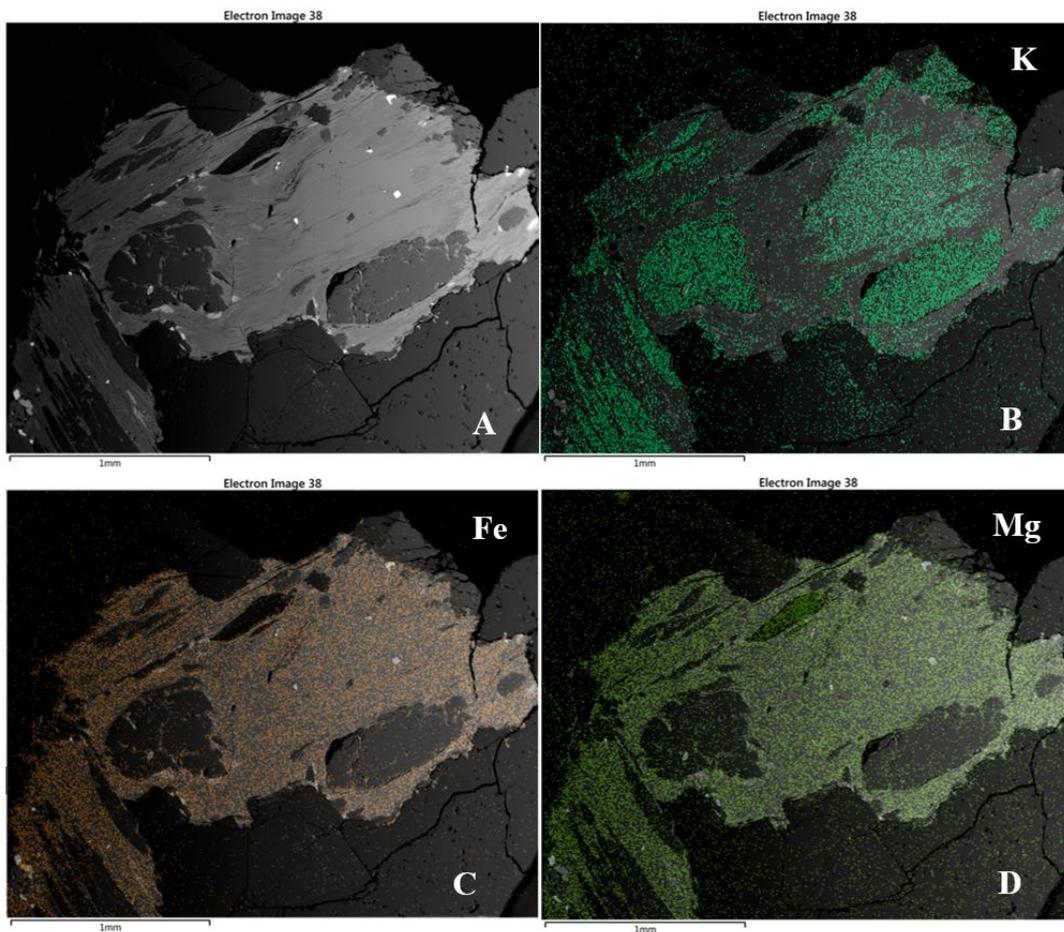


Figura 5.1.2.4: Mapas de elementos obtidos à ME mostrando a variação de composição de um cristal de biotite. A-Imagem de referência; B- Imagem apenas com elemento K em evidência; C- Imagem apenas com elemento Fe em evidência; D- Imagem apenas com elemento Mg em evidência.

### 5.1.3 Difracção de raio-X

A análise por difracção de raio-X foi realizada em seis provetes selecionados. Dois provetes correspondem ao granito à temperatura ambiente e os outros quatro após aplicação das temperaturas de 500°C e de 600°C (Tabela 5.1.3.1), para averiguar a ocorrência de alteração na paragénese que não tivesse sido registada na observação microscópica e na microsonda electrónica.

Tabela 5.1.3.1: Amostras analisadas na difracção de raio-X.

Temperatura	Amostras
25°C	GF25-2 e GA25-4
500°C	GFT e GAT
600°C	GFT-1 GATE-3

As análises feitas nas amostras GF25-2 e GA25-4 (temperatura ambiente) comprovaram a mineralogia registada tanto na microscopia como na microsonda, exceptuando a caulinite que não foi identificado anteriormente. Quando se observam os dois gráficos (Anexo: A.5.1.3.1 e A.5.1.3.2) é notório que a paragénese mineral das duas amostras é composta por: Quartzo + Ortóclase + Albite + Mica dioctaédrica + Caulinite.

Os provetes que foram sujeitas às temperaturas de 500°C e de 600°C (Anexo: A.5.1.4.3, A.5.1.4.4, A.5.1.4.5 e A.5.1.4.6), após serem analisados na difracção de raio-X, registaram a mesma mineralogia que a 25°C, exceptuando o caulino que não foi identificado em nenhuma destas análises.

## 5.2 Fracturas

As duas amostras apresentaram fracturas visíveis à vista desarmada logo aos 400°C (Figura A.5.1.a) e b), em anexo), sendo que a dimensão e o número de fracturas aumentaram com o incremento da temperatura (Figura A.5.1. c) a f), em anexo). Na amostra GATE identificaram-se algumas fracturas preenchidas por óxidos, enquanto na amostra GFTE tal ocorreu apenas em alguns dos grãos (Figura 5.2.1). As amostras têm a mesma textura, com contactos intergranulares muito recortados que, com o aquecimento, podem constituir superfícies de fraqueza que potenciam a propagação das fracturas.

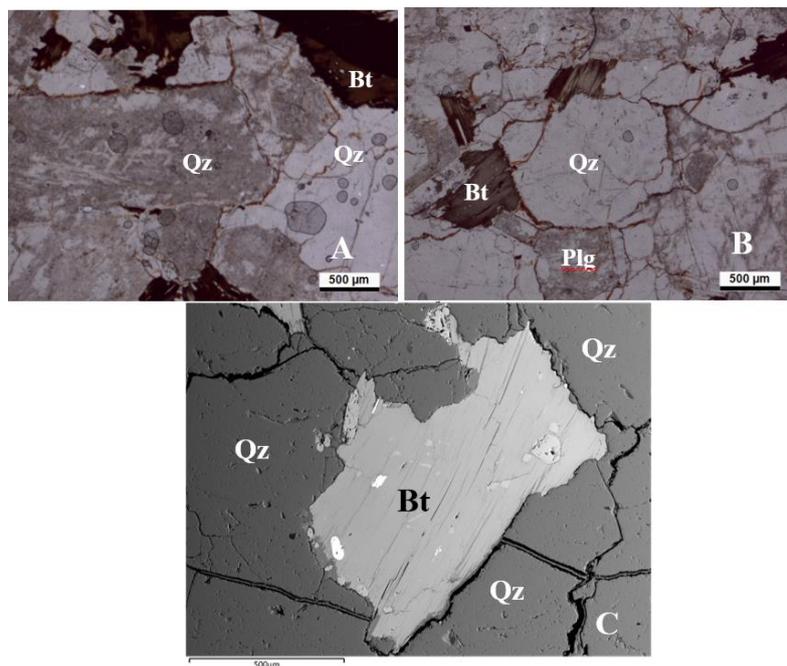


Figura 5.2.1: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 400°C. A- GATE com fracturas intergranulares preenchidas por óxidos. B- GATE com fracturas intergranulares preenchidas por óxidos (imagens 1.1. e 1.2 em N//). C- GFTE com fracturas intergranulares preenchidas e não preenchidas (imagem à microsonda).

À temperatura de 400°C verifica-se um aumento do número de fracturas, tanto intragranulares como também intergranulares. As intergranulares enfraquecem intensamente a estrutura da rocha, mas a esta temperatura a maioria das fracturas encontra-se selada pelo preenchimento. Como é visível nas

Figura 5.2.1A e 5.2.1B as fracturas na amostra GATE estão preenchidas por um produto que, segundo as análises químicas, é um material amorfo. A Figura 5.2.1B mostra que os grãos de quartzo estão intensamente fracturados e que o contacto entre os grãos de biotite-quartzo e feldspato estão preenchidos pelo material amorfo neoformado. A Figura 5.2.1.C revela como as fracturas intergranulares frequentemente derivam das intragranulares que provêm de grãos de quartzo ou de feldspato e se propagam para o contacto entre os grãos. Como esta imagem tem uma maior resolução verifica-se que as fracturas nem sempre estão totalmente preenchidas pelo material amorfo.

As amostras, ao serem sujeitas à temperatura de 500°C, apresentam um maior número de fracturas intergranulares e intragranulares e também o crescimento das existentes. Muitas das novas fracturas intergranulares tiveram origem nas intragranulares pré-existentes à temperatura ambiente, partindo do grão de quartzo ou mesmo do feldspato para o contacto entre grãos (Figura 5.2.2). As fracturas intergranulares ocorrem maioritariamente entre grãos de quartzo e feldspatos (potássico e plagioclase), mas muitas vezes quando existe um contacto triplo (Qz-Fldp-Bt) a fractura aproveita esta superfície de fraqueza e expande (Figura 5.2.2.A), enfraquecendo assim a estrutura interna da rocha. Na Figura 5.2.2.B observa-se uma fractura intergranular a marcar o contacto entre a plagioclase, o quartzo e a biotite, e também várias fracturas intragranulares na plagioclase que se estendem e conectam com a intergranular, que separa o quartzo da plagioclase.

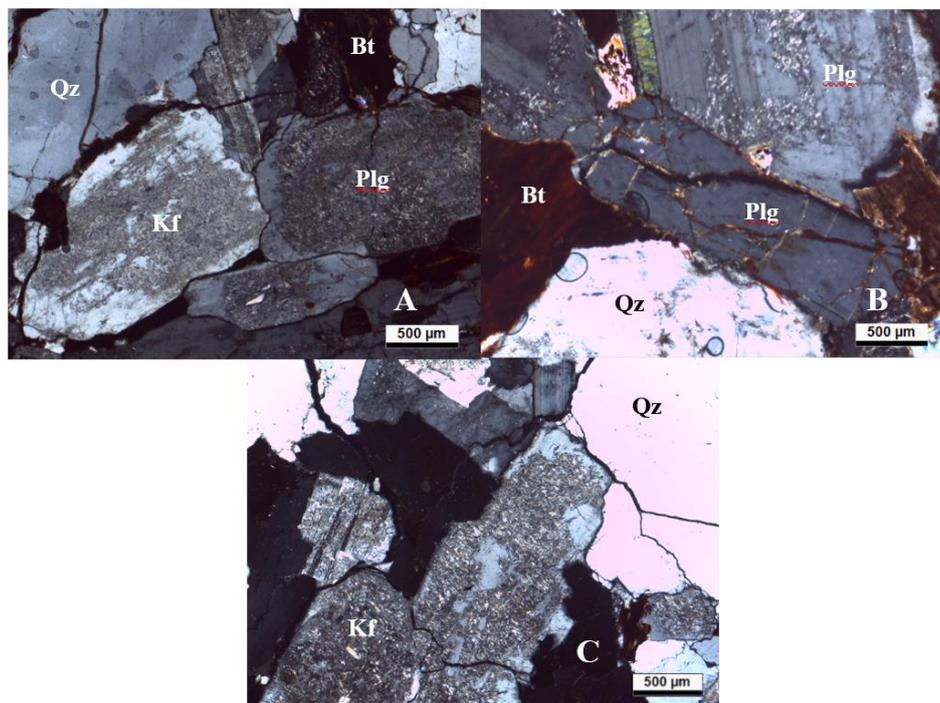


Figura 5.2.2: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 500°C. A- Fracturas intergranulares no contacto entre Qz-Kf-Plg-Bt e intragranulares no quartzo e plagioclases. B- Fracturas intergranulares no contacto entre Qz-Bt-Plg e intragranulares nas plagioclases. C- Fracturas intragranulares no quartzo e plagioclase e intergranulares no contacto entre Qz-Bt-Kf (imagens em NX).

Ao observar a Figura 5.2.2.C verifica-se que as fracturas intragranulares presentes no quartzo à temperatura ambiente tendem a expandir-se e a originar fracturas intergranulares que tanto atravessam os cristais de feldspato em redor como marcam o contacto entre os diversos grãos.

As amostras, após exposição a 600°C, revelam uma estrutura fortemente fragilizada, o que foi possível verificar tanto à vista desarmada como em análise microscópica/microsonda: ocorre o incremento tanto no número de fracturas como na sua abertura e extensão. Na Figura 5.2.3 é visível que as fracturas, tanto intra como intergranulares, para além de terem aumentado em número e em abertura, também se desenvolveram em extensão. As Figuras 5.2.3.A e 5.2.3.D representam o GFTE após o aquecimento a 600°C.

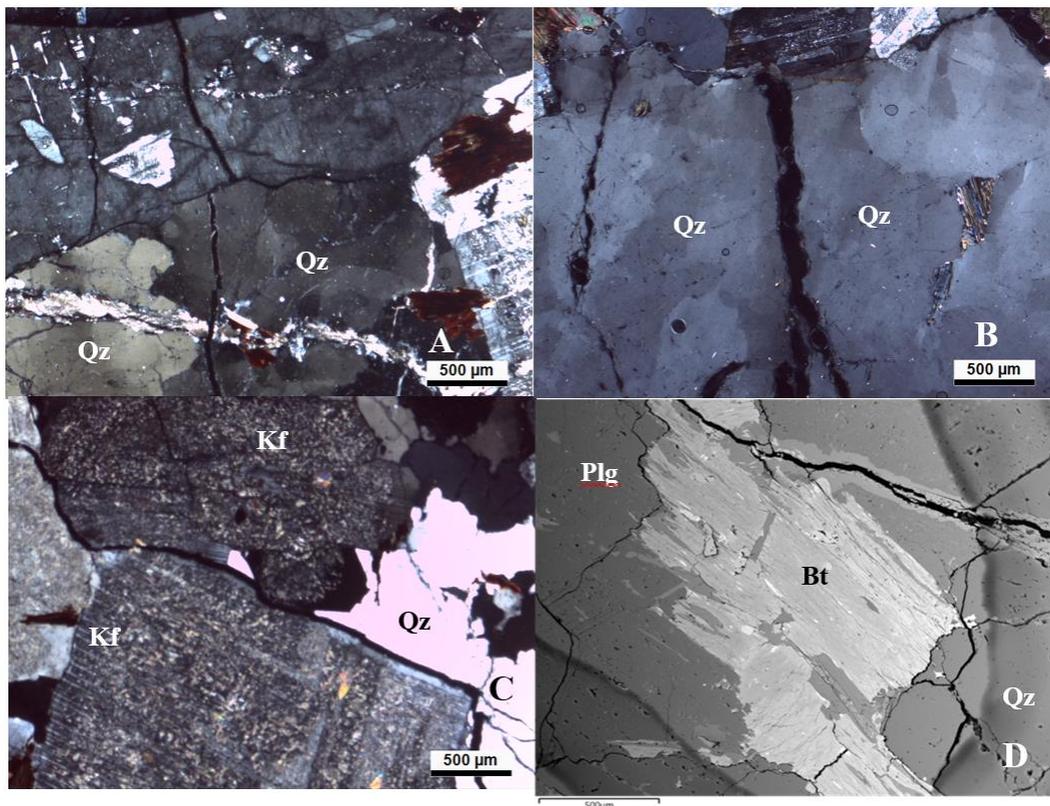


Figura 5.2.3: Fracturas no GATE e GFTE após exposição a 600°C. A- Fracturas intragranulares e intergranulares sem preenchimento e uma fractura intra-intergranular preenchida por carbonatos (GFTE). B- Fractura intragranular que atravessa um grão de quartzo e se liga a uma intergranular entre cristais de quartzo e feldspato (GATE). C- Fracturas intergranular a contornar os bordos entre feldspato potássico e quartzo (GFTE) (imagens em NX). D- Fracturas intragranulares no quartzo e na plagioclase, e também uma fractura intergranular com preenchimento amorfo a cortar tanto a plagioclase como o quartzo (GATE) (imagem à microsonda).

Na Figura 5.2.3.A pode observar-se a fractura intergranular que atravessa o grão de quartzo e biotite, preenchida por calcite (segundo os resultados obtidos no capítulo anterior). Como à temperatura ambiente já tinham sido identificadas fracturas com preenchimento nesta amostra, mas devido à sua reduzida dimensão não foi possível identificar a mineralogia, após o aquecimento a 500°C e 600°C, com a expansão tanto da fractura como do material que a preenche, foi exequível analisar a sua composição.

Muitos dos preenchimentos acompanharam a expansão das fracturas, principalmente os de calcite nos GFTE, enquanto no GATE, o preenchimento é um material amorfo (vidro), que não acompanhou o crescimento das fracturas (Figura 5.2.3.D). As Figuras 5.2.3.B e 5.3.2.D mostram as fracturas existentes na amostra GATE após o aquecimento a 600°C. É evidente que o incremento de 100°C teve um efeito bastante significativo nas fracturas, já que estas para além de se estenderem por todo o provete aumentaram consideravelmente em espessura e comprimento.

Foram feitas tentativas a temperatura superior a 600°C para analisar o comportamento da rocha: um provete da amostra GATE foi submetido a 800°C e outro da amostra GFTE a 700°C. Verificou-se, no entanto, que o granito em estudo não suporta temperaturas superiores a 600°C, dado que a expansão e contracção dos minerais leva a que o granito se desintegre por completo, como mostra a Figura 5.2.4, deixando de se comportar como uma rocha. Nestes provetes já não é possível executar os ensaios de caracterização mecânica propostos, pelo que, nos restantes provetes, a temperatura máxima aplicada foi de 600°C.

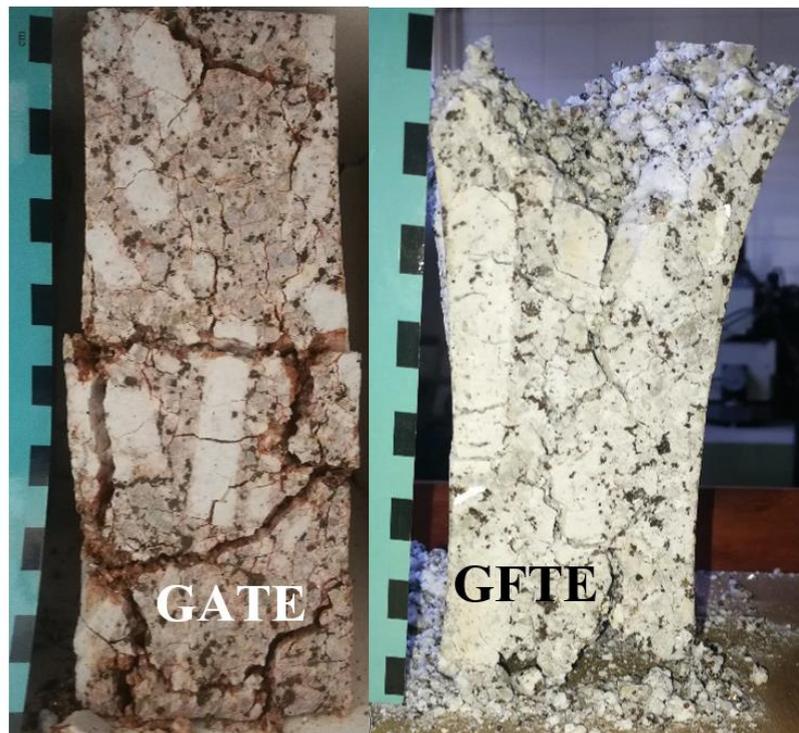


Figura 5.2.4: GATE e GFTE após aquecimento superior a 600°C: o GATE foi sujeito à temperatura de 800°C enquanto o GFTE foi a 700°C.

### 5.3 Porosidade aberta e Massa Volúmica

A porosidade da rocha varia entre 1.17% e 1.64% (Tabelas 5.3.1 e 5.3.2), respectivamente para o granito fresco e o alterado, o que demonstra que mesmo após sofrer processos de alteração natural (GATE) a sua porosidade continua bastante baixa.

Após serem colocados à primeira temperatura, de 400°C, ambas as amostras tiveram uma diminuição de porosidade, com valores semelhantes (-21% e -27%, respectivamente) (Tabelas 5.3.1 e 5.3.2).

Quando sujeitas à temperatura de 500°C as amostras apresentam um aumento de porosidade (Tabela 5.3.1 e 5.3.2), embora discreto, que é de 29% e 18%, para o granito fresco e alterado, respectivamente.

À temperatura de 600°C ocorre um aumento muito significativo da porosidade para ambas as amostras, como é possível observar nas Tabelas 5.3.1 e 5.3.2, passando de um 1.17% e 1.64% para 3.28% e 4.08%, respectivamente para o granito fresco e alterado.

Tabela 5.3.1: Porosidade do GFTE às várias temperaturas.

<b>GFTE</b>				
<b>Temperatura</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Porosidade (%)</b>	1.18	0.87	1.58	3.61
	1.10	0.91	1.49	3.17
	1.22	0.78	1.45	3.05
<b>Média</b>	1.17	0.85	1.51	3.28
<b>Mediana</b>	1.18	0.87	1.49	3.17
<b>Desvio Padrão</b>	0.05	0.06	0.05	0.24

Tabela 5.3.2: Porosidade do GATE às várias temperaturas.

<b>GATE</b>				
<b>Temperatura</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Porosidade (%)</b>	1.61	1.36	1.98	4.82
	1.53	1.24	1.97	3.36
	1.79	1.30	1.80	4.07
<b>Média</b>	1.64	1.30	1.88	4.08
<b>Mediana</b>	1.61	1.30	1.89	4.07
<b>Desvio Padrão</b>	0.11	0.05	0.10	0.60

A massa volúmica do granito em estudo, representada na Tabela 5.3.3, está dentro dos valores de referência para este tipo de rocha, à temperatura ambiente. Verifica-se uma pequena diferença entre o granito fresco e o alterado. Quando a temperatura sobe até aos 400°C a massa volúmica mantém-se praticamente a mesma em ambos (Tabela 5.3.4). A redução na porosidade registada nesta temperatura que não se reflectiu na massa volúmica, excepto apenas uma amostra de GATE que registou um aumento de 2.66 g/cm<sup>3</sup> para 2.77 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 5.3.3: Massa volúmica de GFTE às várias temperaturas.

<b>GFTE</b>				
<b>Temperatura</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Massa Volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.64	2.66	2.62	2.56
	2.64	2.63	2.62	2.46
	2.63	2.64	2.62	2.58
<b>Média</b>	2.64	2.64	2.62	2.55

Ao atingir 500°C a massa volúmica dos provetes diminuiu ligeiramente, em especial para o GATE. O GFTE apresentou uma massa volúmica de 2.62 g/cm<sup>3</sup>, quando inicialmente tinha uma massa volúmica de 2.64 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o GATE tem uma massa volúmica inferior GFTE, com 2.61 g/cm<sup>3</sup>. A esta temperatura a porosidade aumentou significativamente e isso teve influência directa na diminuição da massa volúmica, como é possível verificar na Tabela 5.3.5.

Tabela 5.3.4: Massa volúmica de GATE às várias temperaturas.

<b>GATE</b>				
<b>Temperatura</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Massa Volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.66	2.77	2.61	2.55
	2.65	2.63	2.61	2.57
	2.66	2.65	2.62	2.56
<b>Média</b>	2.66	2.68	2.61	2.56

A maior redução na massa volúmica das amostras registou-se aos 600°C (Tabela 5.3.6). O GATE passou de uma massa volúmica média de 2.66 g/cm<sup>3</sup> para 2.56 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o GFTE teve uma redução menor, passando de 2.64 g/cm<sup>3</sup> para 2.55 g/cm<sup>3</sup>. Esta redução acentuada na massa volúmica acompanha o aumento da porosidade quando a rocha é sujeita aos 600°C.

## 5.4 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi efectuado para as quatro temperaturas definidas (25°C, 400°C, 500°C e 600°C), para verificar o comportamento da rocha nas quatro situações. Esta característica define a capacidade de a rocha absorver água ao longo do tempo e quanto maior for a sua porosidade ou rede fracturas maior será a absorção. A maior absorção de água reflecte a possibilidade de a rocha ficar mais exposta às alterações químicas/físicas e, em consequência, ser susceptível a uma degradação mais rápida.

A diferença entre o GFTE e o GATE (Tabela A4.1, em anexo) é evidente mesmo à temperatura ambiente, em que o primeiro apresenta um valor médio de 0.41 e o segundo 1.63  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ . Esta diferença na absorção de água, que se deve à alteração química e física a que o GATE esteve sujeito quando exposto aos agentes da geodinâmica externa, reflecte-se nos resultados obtidos nas várias temperaturas testadas. A variação da absorção nos provetes da mesma amostra, ou seja, com o mesmo grau de alteração, deve-se à heterogeneidade que a rocha possui. Verifica-se que, quando a superfície em contacto com a água tem megacristais de feldspato, estes absorvem água a uma taxa muito mais elevada do que um provete em que não existam megacristais. A influência dos megacristais foi patente a todas as temperaturas, inclusive quando o megacristal se estendia à face adjacente do provete, observando-se que o nível de água subia mais rapidamente nessa superfície, enquanto nas outras se mantinha num nível bastante inferior. Após o aquecimento estes megacristais tornaram-se num meio preferencial de absorção de água, quase instantânea, por parte da rocha, o que fez com que os provetes com megacristais mostrassem valores de absorção muito mais altos que o os que não tinham.

O GFTE obteve valores médios de 4.31 e 7.21  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$  às temperaturas de 400°C e 500°C, respectivamente, o que indica que a amostra teve um aumento da rede de fracturas e porosidade, enquanto para o GATE para as mesmas temperaturas, obteve 7.88 e 9.26  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ . No entanto, a comparação de valores em relação à absorção inicial de água por parte da rocha, revela que o aumento foi sempre maior no GFTE, em que a amostra absorveu 10.51 e 17.59 vezes mais que o valor inicial. Por sua vez o GATE teve em todas os provetes uma maior absorção de água, mas a diferença para a absorção à temperatura ambiente foi bastante mais baixa, apenas de 4.83 e 5.68 vezes superior aos valores à temperatura ambiente.

Tabela 5.4.1: Taxa de absorção de água a 400°C para GFTE e GATE.

Temperatura (400°C)	GFTE ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ )	GATE ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ )
<b>Média</b>	4.31	7.88
<b>Mediana</b>	4.31	7.51
<b>Desvio Padrão</b>	0.07	0.64

Tabela 5.4.2: Taxa de absorção de água a 500°C para GFTE e GATE.

<b>Temperatura (500°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> *s<sup>0.5</sup>)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> *s<sup>0.5</sup>)</b>
<b>Média</b>	7.21	9.26
<b>Mediana</b>	7.84	9.44
<b>Desvio Padrão</b>	1.05	0.37

Os provetes que foram submetidos à temperatura de 600°C mostraram um aumento muito significativo dos valores de absorção quando comparados com os que foram sujeitos aos 500°C e bastante drástico se forem comparados com o resultado a 25°C. A absorção de água foi maior para o GFTE, cerca de 126.56 vezes, enquanto no GATE foi cerca de 43.65 vezes. Nesta perspetiva, pode verificar-se que o aumento da absorção de água por parte do GFTE é muito acentuado do que do GATE.

Tabela 5.4.3: Taxa de absorção de água a 600°C para GFTE e GATE.

<b>Temperatura (600°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> *s<sup>0.5</sup>)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> *s<sup>0.5</sup>)</b>
<b>Média</b>	51.89	71.16
<b>Mediana</b>	53.85	72.95
<b>Desvio Padrão</b>	3.22	10.18

Em todas as temperaturas a absorção de água foi sempre mais elevada para o GATE, como esperado. Com estes resultados, verifica-se que o GATE fica muito mais susceptível a absorver água do que o GFTE com o aumento de temperatura, mas os danos provocados pelo fogo são muito mais intensos no GFTE que no GATE.

Ao compilar todos os dados das amostras para cada temperatura observa-se o aumento registado tanto nos valores como visualmente. Nos dois gráficos das Figuras 5.4.1 e 5.4.2 é perceptível a diferença significativa da absorção da água à temperatura de 600°C em comparação com as restantes. No GFTE verifica-se que se passou de uma absorção de 0.20 g/m<sup>2</sup>\*s<sup>0.5</sup> segundo a 25°C para 47.35 g/m<sup>2</sup>\*s<sup>0.5</sup> a 600°C, enquanto às temperaturas de 400°C e 500°C os valores estão bastante próximos, 4.31 e 5.65 g/m<sup>2</sup> \*s<sup>0.5</sup>, respectivamente.

O GATE apresenta maior absorção de água do que o GFTE e verifica-se que os valores obtidos entre os 400°C e 500°C já não são tão próximos como no GFTE relativamente à temperatura ambiente e também que a diferença entre os 500°C e os 600°C é menor, sendo apenas cerca de 5 vezes superior.

A análise dos gráficos das Figuras 5.4.1 e 5.4.2 deixa bem claro que existe um patamar entre os 500°C e os 600°C no qual a sua taxa de absorção de água tem uma variação abrupta. O aumento registado entre os 400°C e os 500°C, que corresponde a uma diferença térmica de 100°C, é pouco significativo, principalmente nos GFTE. Mas para a mesma diferença térmica de 100°C, entre os 500°C e os 600°C há aumento evidente de absorção nas duas amostras, o que mostra que houve alterações significativas na rocha entre estas duas temperaturas.

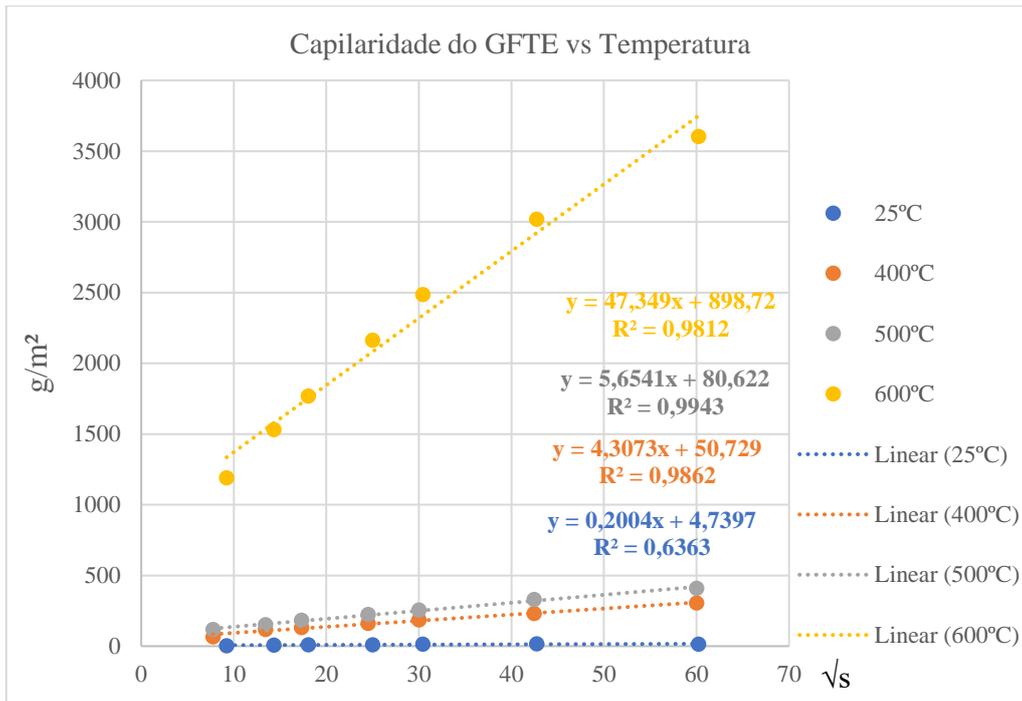


Figura 5.4.1: Comparação da absorção de água de GFTE para as várias temperaturas.

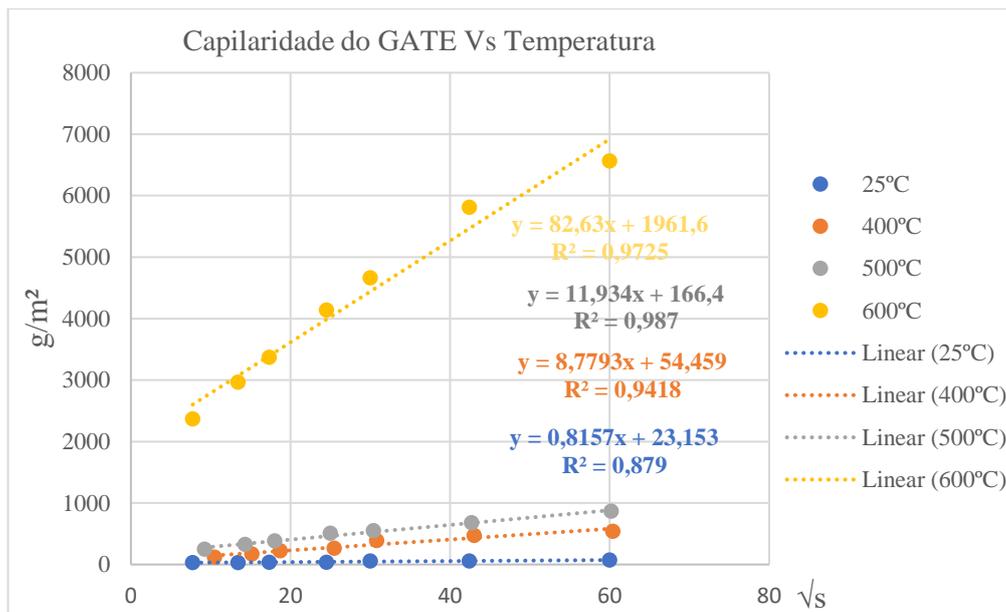


Figura 5.4.2: Comparação da absorção de água de GATE para as várias temperaturas.

Ao realizar os ensaios de capilaridade nas amostras observou-se que absorção de água deu-se num intervalo de tempo mais curto. por parte dos provetes a temperaturas mais elevadas, que foi proporcional ao incremento da temperatura. Enquanto os provetes a 25°C nunca chegaram a saturar totalmente e a coluna de água nunca ultrapassou 1/5 da sua altura, os provetes submetidos a 400°C e a 500°C saturaram ao fim de 24 horas. A evolução da altura da água registada nos provetes sujeitas a 600°C foi tão elevada que em 1h as amostras ficaram completamente saturadas, sendo possível observar à vista desarmada a ascensão da água nos provetes até a coluna de água atingir o topo.

## 5.5 Velocidade da propagação das ondas P e S

A velocidade das ondas P e S no granito a 25°C, mostra uma ligeira diferença entre o GFTE e GATE. O primeiro apresenta uma velocidade superior ao segundo como se observa pelos valores médios na Tabela 5.5.1 (os valores de cada provete encontram-se na Tabela A6.1 em anexo) devido à menor porosidade do GFTE, com influência directa na velocidade das ondas P e S, porque como o meio é mais contínuo, a onda tende a não perder velocidade tão rapidamente como acontece se tiver descontinuidades ou poros. Os valores obtidos tanto para a amostra GFTE como para o GATE tiveram variações bastante significativas, mas o granito alterado mostra uma maior diferença entre o valor máximo e mínimo. Esta diferença registada em ambos o granito reflecte a heterogeneidade, que já tinha sido evidenciada na observação macroscópica. Na amostra GATE o diferente grau de alteração nos vários provetes leva a que haja uma diferença acentuada na velocidade das ondas P e S. Julga-se ainda que estas variações de velocidade dependem da orientação dos megacristais de feldspatos. Como as medições foram feitas segundo o eixo de maior comprimento do provete, as amostras que tinham os megacristais de feldspatos com esta orientação obtiveram uma velocidade mais elevada em ambas as ondas, enquanto os que tinham estes cristais perpendiculares ou com ângulo diferente tiveram um valor mais baixo.

Tabela 5.5.1: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 25°C.

<b>Granitos a 25°C</b>				
	<b>GFTE</b>		<b>GATE</b>	
	<b>Ondas P (m/s)</b>	<b>Ondas S (m/s)</b>	<b>Ondas P (m/s)</b>	<b>Ondas S (m/s)</b>
<b>Média</b>	4258.70	2338.69	3530.45	1952.36
<b>Máximo</b>	4475.63	2811.60	3950.73	2138.90
<b>Mínimo</b>	4130.42	2065.97	3142.21	1652.98

Após a exposição de todos os provetes às temperaturas de 400°C, 500°C e 600°C, procedeu-se à análise das velocidades das ondas P e S nas duas amostras. A temperatura de 400°C teve um efeito imediato na velocidade das ondas P e S, com redução de  $\approx 36\%$  nas ondas P, enquanto as S tiveram uma redução de  $\approx 57\%$  nos provetes GFTE. No caso do granito alterado verifica-se uma redução na velocidade das ondas P de  $\approx 41\%$  e as ondas S tiveram uma redução de  $\approx 43\%$ . Esta diminuição da velocidade das ondas acentuada nas duas amostras, indica que houve um aumento de fracturas e poros nas estruturas das amostras. Em ambas as amostras houve uma diminuição da porosidade aberta, o que por sua vez devia levar a que a velocidade das ondas P e S aumentasse, mas como o resultado foi o oposto admite-se que o aquecimento tenha causado um aumento da porosidade fechada, o que faz com que a velocidade diminuía como foi registado nestes provetes.

Tabela 5.5.2: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 400°C.

<b>Granitos a 400°C</b>				
	<b>Ondas P (m/s)</b>		<b>Ondas S (m/s)</b>	
<b>GFTE</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>
<b>Média</b>	4258.70	2713.58	2339.13	1396.23
<b>Mediana</b>	4294.45	2708.57	2262.59	1395.19
<b>GATE</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>
<b>Média</b>	3530.45	2295.99	1952.36	1042.54
<b>Mediana</b>	3368.25	2343.64	1930.19	1134.58

O aquecimento à temperatura de 500°C fez com que houvesse uma quebra mais acentuada na velocidade das ondas P e S em ambas as amostras. O GFTE teve uma redução na velocidade das ondas P de  $\approx 53\%$ , enquanto a diminuição no GATE foi de  $\approx 71\%$ , no caso das ondas S a redução foi de 50% e 48%, respectivamente. Como é possível observar na Tabela 5.5.3 os valores médios da velocidade das ondas P (em anexo os valores completos A6.2), tanto numa como na outra amostra, mostram uma variação bastante ampla nos valores após aquecimento. Esta variação tinha sido registada à temperatura ambiente e continua a ser evidente tanto nos provetes que foram sujeitos a 400°C como a 500°C.

Tabela 5.5.3: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 500°C.

<b>Granitos a 500°C</b>				
	<b>Ondas P (m/s)</b>		<b>Ondas S (m/s)</b>	
<b>GFTE</b>	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>
<b>Média</b>	4258.70	1976.99	2339.13	1111.71
<b>Mediana</b>	4294.45	1997.54	2262.59	1113.00
<b>GATE</b>	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>
<b>Média</b>	3530.45	1810.32	1952.36	912.58
<b>Mediana</b>	3368.25	1773.62	1930.19	924.47

As amostras mostraram uma diminuição drástica na velocidade das ondas P e S quando sujeitas à temperatura de 600°C. Após o aquecimento as amostras obtiveram valores muito próximos, o que não se tinha registado em nenhuma das restantes temperaturas testadas. A variação nas amostras do GFTE é mínima, ficando por valores entre os 700 m/s e 800m/s, enquanto o GATE teve uma variação ligeiramente superior, entre os 600 m/s e os 850 m/s. A queda da velocidade das ondas P e S em relação à temperatura ambiente foi superior à verificada nas outras temperaturas testadas: nas ondas P houve uma redução de cerca de 80% para o GFTE e o GATE, enquanto nas ondas S o valor foi ligeiramente inferior, cerca de 78% para ambos.

Tabela 5.5.4: Velocidade das ondas P e S à temperatura de 600°C.

<b>Granitos a 600°C</b>				
	<b>Ondas P (m/s)</b>		<b>Ondas S (m/s)</b>	
<b>GFTE</b>	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Média</b>	4258.70	747.99	2339.13	482.24
<b>Mediana</b>	4294.45	741.28	2262.59	462.28
<b>GATE</b>	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>
<b>Média</b>	3530.45	708.44	1952.36	466.59
<b>Mediana</b>	3368.25	692.05	1930.19	450.51

## 5.6 Resistência à tracção

Os valores obtidos de resistência à tracção mostram que em todos os provetes das duas amostras há um decréscimo com o aumento da temperatura, confirmando os resultados de outros autores (Liu et al., 2014; Yin et al., 2016; Zhao et al., 2018). À temperatura ambiente verifica-se que existe uma diferença entre o GFTE e o GATE, sendo o primeiro mais resistente que o segundo. Analisando os valores médios na Tabela 5.6.1 (valores completos na Tabela A7.1 em anexo), pode concluir-se que existe uma variação para os diferentes provetes das duas amostras de granito, mostrando a influência da heterogeneidade devido à presença dos megacristais.

Tabela 5.6.1: Ponto de rotura médio para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 25°C.

<b>Resistência à Tracção</b>		
<b>25°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>Média</b>	9.07	7.31
<b>Mediana</b>	9.62	7.06

Nas amostras que foram sujeitas ao aquecimento a 400°C (Tabela 5.6.2, os valores obtidos estão em anexo na Tabela A7.2), o GFTE apresenta um valor médio de resistência de 4.74 MPa, enquanto o GATE mostra um valor superior, cerca de 5.76 MPa. Ambos perderam resistência com o aquecimento, mas o GATE perdeu menos resistência que o GFTE. Este facto verificou-se para todos os provetes.

Tabela 5.6.2: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 400°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>400°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>400°C</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>Média</b>	4.74	<b>Média</b>	5.76
<b>Mediana</b>	4.72	<b>Mediana</b>	5.85

A segunda temperatura testada foi a de 500°C (Tabela 5.6.3, os valores absolutos estão em anexo na Tabela A7.3) e de novo houve uma diminuição da resistência à tracção, com um valor médio de 4.73 MPa para o GFTE e 4.17 MPa para o GATE. Os valores obtidos para a temperatura de 500°C são próximos dos que resultaram de aquecimento a 400°C, sugerindo que não existe variação neste intervalo de 100°C. Verifica-se, no entanto, que o GATE mostra maior variação, com valores mais baixos de resistência.

Tabela 5.6.3: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 500°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>500°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>500°C</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>Média</b>	4.73	<b>Média</b>	4.17
<b>Mediana</b>	4.63	<b>Mediana</b>	4.43

A variação de valores para os 600°C. Na tabela 5.6.4, apresentam-se os valores médios e a mediana da resistência à tracção, os valores de todas as amostras ensaiadas, encontram-se em anexo na tabela A7.3. As duas amostras foram semelhantes, ambos cederam muito mais rapidamente, quando comparado com as duas temperaturas anteriores. No entanto, analisando apenas a resistência das amostras sujeitas a 500°C e 600°C conclui-se que a redução foi superior a 50%.

Tabela 5.6.4: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção após aquecimento de 600°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>600°C</b>	<b>Granito Fresco “GFTE-B” <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>600°C</b>	<b>Granito Alterado “GATE-B” <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>Média</b>	1.86	<b>Média</b>	2.28
<b>Mediana</b>	1.56	<b>Mediana</b>	1.79

## 5.7 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade

Os primeiros provetes a serem ensaiados serviram de referência, correspondendo à temperatura de 25°C. Como era expectável houve uma diferença entre o GFTE e GATE, apresentando o segundo, valores mais baixos do que o primeiro. Segundo a Tabela 5.7.1 (os valores de cada amostra encontram-se em anexo na Tabela A7) é perceptível que os provetes mostraram gamas de valores diferentes uma da outra, o que pode indicar graus de alterações diferentes na rocha e na sua heterogeneidade. Estes intervalos de valores verificaram-se a todas as temperaturas.

Tabela 5.7.1: Valor médio padrão do ponto de rotura de GFTE e GATE à compressão uniaxial.

<b>Temperatura de 25°C</b>	<b>GFTE (MPa)</b>	<b>GATE (MPa)</b>
<b>Média</b>	104.25	73.33
<b>Mediana</b>	102.36	75.55
<b>Desvio Padrão</b>	6.41	7.00

Posteriormente foram ensaiados os provetes submetidos às temperaturas de 400°C, 500°C e 600°C, para os provetes das amostras GFTE e GATE (Tabelas 5.7.2. a 5.7.4).

Tabela 5.7.2: Valores do ponto de rotura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 400°C.

<b>Temperatura de 400°C</b>	<b>GFTE (MPa)</b>	<b>GATE (MPa)</b>
<b>Média</b>	74.51	87.86
<b>Mediana</b>	75.16	90.93
<b>Desvio Padrão</b>	4.90	9.41

O GFTE teve uma redução de 28% em relação à temperatura ambiente, o que demonstra que a resistência à compressão diminui com a temperatura (Tabela 5.7.2, os valores completos estão em anexo na Tabela A7). A explicação pode encontrar-se na expansão térmica dos minerais presentes, já que nenhum sofre qualquer alteração química ou estrutural a esta temperatura. Por sua vez o GATE aumentou a resistência à compressão uniaxial em 17.6%.

Tabela 5.7.3: Valores do ponto de rotura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 500°C.

<b>Temperatura de 500°C</b>	<b>GFTE (MPa)</b>	<b>GATE (MPa)</b>
<b>Média</b>	57.98	80.18
<b>Mediana</b>	57.92	81.20
<b>Desvio Padrão</b>	2.65	10.25

A 500°C o GFTE (Tabela 5.7.3, os valores completos estão em anexo na Tabela A7) mostrou de novo uma diminuição da resistência à compressão em relação à temperatura ambiente, tendo uma redução de 30.72%, mas um valor bastante próximo do obtido para a temperatura de 400°C, o que indica que o incremento de 100°C não tem uma influência muito significativa no comportamento da rocha. No GATE mais uma vez houve um incremento da resistência à compressão, cerca de 16%, demonstrando que não ocorreu uma diferença significativa relativamente aos provetes que foram sujeitos à temperatura de 400°C.

Tabela 5.7.4: Valores do ponto de rotura de GFTE e GATE à compressão uniaxial, após aquecimento a 600°C.

<b>Temperatura de 600°C</b>	<b>GFTE (MPa)</b>	<b>GATE (MPa)</b>
<b>Média</b>	35.86	46.38
<b>Mediana</b>	36.11	44.31
<b>Desvio Padrão</b>	2.18	8.19

À temperatura de 600°C (Tabela 5.7.4, os valores completos estão em anexo na Tabela A7) ambas as rochas mostraram uma queda acentuada da resistência à compressão. O GFTE foi o que teve o menor valor registado, tendo uma redução da resistência em cerca de 66% enquanto no GATE ocorreu uma diminuição de 37%.

O incremento de temperatura também influencia tanto o módulo de elasticidade como o coeficiente de Poisson da rocha. Os provetes que representam o GFTE e o GATE à temperatura ambiente tiveram resultados ligeiramente diferentes um do outro (Tabela 5.7.5, os valores completos estão em anexo na Tabela A7), em que o GFTE apresentou valores mais elevados tanto no módulo de elasticidade como o coeficiente de Poisson. Verifica-se que  $E_s$  é superior a  $E_d$  em ambas as amostras, enquanto o contrário se passou para os valores de  $v_s$  e  $v_d$ .

Tabela 5.7.5: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$  e  $v_s$ ) e dinâmico ( $E_d$  e  $v_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 25°C.

<b>25°C</b>									
<b>GFTE</b>	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$	<b>GATE</b>	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$
Média	48.83	0.19	38.51	0.22	Média	34.5	0.15	27.35	0.28

As amostras GFTE e GATE na primeira temperatura testada tiveram uma redução no módulo de elasticidade ( $E_s$ ) de 62% e 27% respectivamente, enquanto o coeficiente de Poisson ( $v_s$ ) mostra uma diminuição nos valores de 68% e 60%. Na Tabela 5.7.6 verifica-se que os valores de ambas as amostras se aproximaram, tanto para o módulo de elasticidade como para o coeficiente de Poisson. Ao calcular o módulo de elasticidade dinâmico, tal como o coeficiente de Poisson dinâmico, verifica-se que  $E_d$  para as duas amostras apresenta valores mais baixos do que  $E_s$ , enquanto para o coeficiente de Poisson os valores de  $v_d$  foram muito superiores ao de  $v_s$ .

Tabela 5.7.6: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$  e  $v_s$ ) e dinâmico ( $E_d$  e  $v_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 400°C.

<b>400°C</b>									
<b>GFTE</b>	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$	<b>GATE</b>	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$
Média	18.37	0.06	13.59	0.32	Média	24.95	0.06	7.92	0.36

À temperatura de 500°C houve uma ligeira descida em ambos os parâmetros, para as duas amostras (Tabela 5.7.7). A amostra GFTE obteve valores mais baixos para o módulo de elasticidade enquanto o GATE teve valores mais baixos para o coeficiente de Poisson. Quando se compara o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson estático e dinâmico verifica-se que  $E_d$  é inferior a  $E_s$ , e  $v_d$  é superior a  $v_s$ .

Tabela 5.7.7: Valores médios do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, estático ( $E_s$  e  $v_s$ ) e dinâmico ( $E_d$  e  $v_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 500°C.

500°C									
GFTE	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$	GATE	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$
Média	11.90	0.04	8.25	0.27	Média	13.79	0.03	5.81	0.31

Os valores do módulo de elasticidade voltaram a diminuir com o aumento da temperatura, neste caso até aos 600°C (Tabela 5.7.8). O GFTE teve uma redução de 90% enquanto o GATE decresce 84%, em relação à temperatura ambiente. O coeficiente de Poisson por sua vez manteve-se praticamente igual para o GFTE enquanto no GATE mostrou um aumento, comparado com as duas temperaturas anteriores (400°C e 500°). O módulo de elasticidade dinâmico voltou a ter valores inferiores ao estático ao contrário do coeficiente de Poisson, em que o dinâmico foi sempre superior ao estático.

Tabela 5.7.8: Valores médios do módulo de elasticidade e razão de Poisson, estático ( $E_s$  e  $v_s$ ) e dinâmico ( $E_d$  e  $v_d$ ), de GFTE e GATE à temperatura de 600°C.

600°C									
GFTE	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$	GATE	$E_s$ (GPa)	$v_s$	$E_d$ (GPa)	$v_d$
Média	4.94	0.03	1.37	0.13	Média	5.20	0.08	1.17	0.29

## 5.8 Cor

As análises dos parâmetros de cor na rocha servem para que haja um comprovativo científico da observação à vista desarmada das alterações que surgem na superfície da rocha quando sujeita a temperaturas elevadas. Por isso foi necessário criar um padrão dos parâmetros para a rocha em análise, já que devido à sua heterogeneidade granular, é difícil estabelecer uma referência. Ao analisar a Tabela A5.2 (em anexo) com os valores médios de cada parâmetro, verifica-se que os dados são bastante variáveis (para dados totais ver Tabela A5.1 nos Anexos).

Os resultados obtidos nas amostras a 25°C serviram como padrão para as outras três temperaturas, em que se analisaram todos os provetes para se observar a mudança nos parâmetros de cor de cada provete e assim os resultados poderem ser mais precisos. As Tabelas 5.8.1 e 5.8.2 apresentam o resumo dos valores obtidos para as várias temperaturas.

Analisando todos os valores obtidos, verifica-se que para os provetes de GFTE  $L^*$  indica tonalidade clara, com valores compreendidos entre 65 e 72. O parâmetro  $a^*$  varia entre -1.10 e -0.73

enquanto o  $b^*$  varia entre 0.62 e 1.42. Para os GATE os valores são ligeiramente diferentes: o parâmetro  $L^*$  tem valores uma gama maior (60 a 72),  $a^*$  varia entre -1.23 e 0.01 e  $b^*$  entre 4.70 e 10.45. É desde já perceptível que o grau de alteração natural que distingue os GFTE e os GATE tem influência nos parâmetros de cor da rocha, com valores distintos nos parâmetros  $b^*$  e  $a^*$ , enquanto  $L^*$ , em ambas as amostras, foi semelhante.

Tabela 5.8.1: Comparação dos parâmetros de cor padrão ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) do GFTE para as várias temperaturas testadas.

Parâmetros de cor (média)							Variação dos parâmetros		
	Aquecidos			Padrão (25°C)					
Temperatura	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$
400°C	64.20	0.13	4.13	68.80	-0.97	1.21	4.60	0.84	2.92
500°C	64.91	0.42	4.91	66.05	-0.94	0.80	1.14	0.52	4.11
600°C	68.14	0.61	5.13	70.13	-0.99	1.20	1.99	0.38	3.93

Tabela 5.8.2: Comparação dos parâmetros de cor padrão ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) do GATE com as várias temperaturas testadas.

Parâmetros de cor (média)							Variação dos parâmetros		
	Aquecidos			Padrão (25°C)					
Temperatura	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$
400°C	62.16	1.93	6.30	68.28	-0.47	6.43	6.12	1.46	0.13
500°C	63.96	3.72	9.33	69.44	0.33	8.42	5.48	3.39	0.91
600°C	65.52	5.49	6.22	66.73	-0.37	12.04	1.21	5.12	5.82

Na amostra GFTE o parâmetro neutro ( $L^*$ ) teve uma diminuição nos valores à temperatura de 400°C, o que indica que a superfície da rocha escureceu em comparação ao padrão definido. Por sua vez o parâmetro  $a^*$  teve um aumento pouco significativo nos seus valores, ao contrário do parâmetro  $b^*$  que teve valores muito mais elevados do que os registados no padrão, e isto pode ser justificado com algumas manchas amarelas que surgiram posteriormente ao aquecimento. Visualmente foi possível verificar que os provetes tiveram um ligeiro escurecimento em relação à rocha à temperatura ambiente.

Ao atingir 500°C o parâmetro  $L^*$  manteve-se bastante semelhante aos valores obtidos nos provetes a 400°C, mas os parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  apresentaram um aumento substancial em relação à temperatura ambiente, o que demonstra que a temperatura tem um efeito directo no aspecto visual da rocha.

Os provetes que foram submetidos a aquecimento a 600°C não variaram significativamente o parâmetro  $L^*$ , mantendo-se na mesma gama de valores, mas de novo, os valores dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  mostraram um aumento substancial em relação aos valores padrão.

Visualmente observa-se o escurecimento da superfície dos provetes quando expostos à temperatura de 400°C, que tende a clarear com o aumento da temperatura. Aos 600°C os provetes exibem uma tonalidade mais clara, esbranquiçada, mesmo quando comparada com a padrão. Os parâmetros  $a^*$

e  $b^*$  vão aumentando com a temperatura, mas esta alteração não é facilmente avaliada à vista desarmada, já que a rocha parece ganhar apenas uma tonalidade mais clara em relação à rocha padrão.

Os provetes GATE, que já apresentavam algum grau de alteração natural, mostraram valores bastantes distintos nos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  quando comparado com os GFTE. Aos 400°C os valores de  $L^*$  diminuíram ligeiramente. No caso do parâmetro  $a^*$ , que regista os tons verdes e vermelhos, observou-se uma alteração significativa, dado que aos 400°C a rocha ganhou uma tonalidade alaranjada à superfície. O mesmo ocorreu aos 500°C e aos 600°C já que os valores de  $a^*$  e  $b^*$  tendem a aumentar com a temperatura, o que corresponde ao que se observa à vista desarmada na superfície da rocha. Os tons vermelhos e amarelos tornam-se dominantes na rocha quando passa o patamar dos 500°C e por isso os valores obtidos para estes dois parâmetros são tão elevados quando comparado com os valores padrão. No caso dos 600°C a rocha teve uma diminuição dos valores para o parâmetro  $L^*$ , devido ao facto de a rocha ganhar uma tonalidade mais escura, de tonalidade vermelha.

## 6. Discussão

### 6.1 Análise Petrográfica

#### 6.1.1 Microscopia e microsonda electrónica

Os dados analisados ao microscópio óptico e à microsonda electrónica confirmam que a paragénese mineral das duas amostras GFTE e GATE é semelhante, variando apenas no grau de alteração. Os resultados obtidos no capítulo 5.1, representados nas Tabelas 5.1.2.1 e 5.1.2.2 mostram a semelhança mineralógica aqui evidenciada. No GATE identificou-se oligóclase, que não foram encontradas no GFTE, mas a presença destes dois minerais não altera a paragénese principal devido à sua baixa percentagem neste granito. Por outro lado, o forte zonamento dos cristais de plagióclase indica a presença de zonas mais ricas em cálcio.

O quartzo e as ilmenites não apresentaram qualquer alteração nas suas composições químicas, mas o quartzo tem uma influência no enfraquecimento da estrutura do granito com o aquecimento. O quartzo presente no granito encontra-se na forma de quartzo- $\alpha$ , estrutura cristalina hexagonal que é estável a temperaturas inferiores a 573°C. Ao ser sujeito a aquecimento este mineral tende a expandir de maneira anisótropa. Antes de atingir os 573°C, o quartzo pode aumentar de volume em 3.76% (Skinner, 1966). Este aumento de volume é o principal responsável pelo enfraquecimento da estrutura da rocha. Para temperaturas superiores a 573°C o quartzo  $\alpha$  sofre uma transformação estrutural (Skinner, 1966), formando quartzo  $\beta$ . Esta transformação tem um aumento instantâneo no volume em 0.79% (de 3.76% para 4.55%), sem que aumente mais que os 4.55% (Skinner, 1966), mantendo-se com o mesmo volume a temperaturas mais elevadas. Durante o arrefecimento lento do granito, o quartzo tende a recuperar a forma quando a temperatura desce abaixo dos 573°C, dando-se a transformação inversa de quartzo  $\beta$  para  $\alpha$ . Esta inversão tem uma redução instantânea do volume do quartzo de 0.79% (Skinner, 1966).

Com o aquecimento o quartzo requer espaço para expandir termicamente, este aumento de volume vai criar fracturas (intra e intergranulares), danificando a estrutura do granito, principalmente após ultrapassar a temperatura de transformação. Por sua vez com o arrefecimento este tende a perder volume (instantaneamente) com a transformação inversa, o que faz com que haja contração da estrutura do mineral e aumento das fracturas e poros.

Por esta razão, os autores referem que a temperatura crítica para o granito é de 600°C (Gomez Heras, 2005; Vasquez et al., 2016), indicando o quartzo como responsável pela quebra nas características mecânicas do granito. O feldspato potássico também tem uma expansão térmica relevante, aos 400°C aumenta 0.48% e a 600°C regista uma expansão de 0.9% (Skinner, 1966). No granito estudado, devido às grandes dimensões dos megacristais (cristais com cerca de 30 a 70 mm de comprimento), esta

expansão térmica tenha uma maior importância no enfraquecimento da estrutura. Para uma temperatura de 800°C o feldspato potássico aumenta a expansão para 1.45% (Skinner, 1966), aumentando a sua influência nos danos provocados na rocha. As características destes dois minerais, o quartzo e o feldspato potássico, justificam que o granito não resista a temperaturas superiores a 600°C. A expansão térmica de ambos a essas temperaturas faz com que seja mais fácil a criação de fracturas, tanto cortando os minerais (intragranulares) como no contacto dos grãos (intergranulares).

A oxidação da biotite com o aumento da temperatura faz com que o ferro ferroso passe a ferro férrico (Sanz et al., 1983), por isso os resultados obtidos nas Tabelas 5.1.2.3 a 5.1.2.6 são os valores que se admite que existam de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  nas biotites com o incremento da temperatura. Esta oxidação do  $Fe^{2+}$  não deverá ser responsável pela mudança de cor referida no capítulo 5.8, que é atribuída exclusivamente ao preenchimento das fracturas no granito que apresenta alteração natural. Se a alteração de ferro ferroso para ferro férrico nas biotites fosse a responsável pela coloração vermelha no GATE, o mesmo teria de se passar no GFTE, o que não se verificou em nenhuma das amostras testadas.

As análises pontuais à microsonda electrónica do preenchimento das fracturas do GATE não foram conclusivas porque à temperatura de 25°C o preenchimento era demasiado estreito para o feixe analisar e para as temperaturas mais altas os dados da análise não correspondem a qualquer mineral conhecido, tendo-se considerado que o preenchimento é formado por um material amorfo neoformado (ou um vidro), composto por sílcio, alumínio, ferro e magnésio.

### **6.1.2 Difraccção de raio-X**

Os resultados obtidos confirmam as análises feitas à microsonda electrónica, tendo sido ainda identificados mica dioctaédrica e caulinite. A caulinite resulta da alteração do feldspato tendo sido identificado na difracção de raio-X. A mica dominante no granito é a biotite e a moscovite é um mineral acessório, tendo sido apenas observada em algumas das lâminas analisadas. Confirma-se, assim, a sua presença de moscovite em baixo teor no granito estudado.

## **6.2 Fracturas**

O número de fracturas no granito é directamente proporcional ao aumento da temperatura. Originalmente o granito apresentava algumas fracturas, tanto intra como intergranulares, mas apenas visíveis ao microscópio óptico e, com mais dificuldade à vista desarmada no granito alterado.

Ao atingir a primeira temperatura, 400°C, ambas as amostras apresentaram fracturas visíveis à vista desarmada, embora discretas quando comparadas com a observação feita no microscópio óptico ou à microsonda. A maioria das fracturas encontra-se preenchida, principalmente no GATE, por um material amorfo (vidro) que fez com que a porosidade baixasse a esta temperatura, em vez de aumentar como era expectável. No GFTE algumas das fracturas intergranulares estão preenchidas por calcite o que também teve influência na redução da porosidade da rocha.

Aos 500°C o número de fracturas visíveis à vista desarmada aumenta significativamente em ambas as amostras e na observação ao microscópio verifica-se que o número de fracturas teve um incremento bastante significativo, assim como o aumento da espessura e da extensão das mesmas. A expansão das fracturas intergranulares à temperatura de 500°C é maior que a expansão do material que a preenche, material amorfo nos GATE e a calcite nos GFTE, o que faz com que a estrutura da rocha seja afectada, como se registou em todos os ensaios mecânicos efectuados em ambas as amostras.

A temperatura de 600°C teve um efeito mais intenso no número de fracturas nas duas amostras. A esta temperatura, a abertura dos contactos entre os cristais é visível à vista desarmada. As fracturas intragranulares na sua maioria deram origem a novas fracturas intergranulares que cortam o contacto entre os grãos, muitas vezes aproveitando a junção tripla (quartzo-feldspato-biotite) para crescer e propagar-se. As fracturas intragranulares muitas das vezes acompanham as maclas e os planos de clivagem da plagioclase e do feldspato potássico. Nos grãos de quartzo não existem planos preferenciais para as fracturas intragranulares e são numerosas as criadas durante a expansão e arrefecimento do mineral. Quando a temperatura de transformação do quartzo ( $\approx 573^\circ\text{C}$ ) de  $\alpha$  para  $\beta$  é excedida, o quartzo apresenta muito mais fracturas internas do que os restantes minerais presentes no granito devido à expansão e posterior contracção durante o arrefecimento.

A biotite é o único mineral que não apresentou fracturas intragranulares em nenhuma das temperaturas testadas, sendo todas as fracturas associadas a este mineral intergranulares, isto é, contornam o bordo do grão, separando-o dos outros minerais.

### 6.3 Porosidade e Massa volúmica

O granito é no geral uma rocha com porosidade baixa, tal como foi possível verificar na secção 5.3 em que se mostra que a porosidade de GFTE e GATE é de 1.17% e 1.64%.

Após serem colocados à primeira temperatura, de 400°C, ambas as amostras tiveram uma diminuição de porosidade. Algo que não era espectável, já que em nenhum dos estudos feitos por outros autores (Hajpal & Törörk, 2004; Gómez Heras et al., 2006; Chaki et al., 2008; Xu et al., 2008; Pires et al., 2014) houve registo de uma diminuição da porosidade com o aumento da temperatura. Em ambas as amostras, a diminuição foi similar (-21% e -27% para GFTE e GATE, respectivamente). O aquecimento até esta temperatura levou a que a porosidade diminuísse, o que significa que houve uma diminuição dos poros ou, estes apenas ficaram isolados devido à expansão térmica dos minerais o que levou ao fecho ou isolamento dos poros. Na secção 5.8 verificou-se que a maioria das fracturas estava parcial ou totalmente preenchida. No caso do GFTE o preenchimento é constituído por calcite enquanto no GATE as fracturas são preenchidas por um material neoformado amorfo, já que após as análises pontuais à microsonda e as análises feitas na difracção de raio-X não foi possível caracterizar mineralogicamente esse material. Como 400°C é uma temperatura relativamente baixa para a formação de fracturas no granito, as que se formam a esta temperatura não tem a mesma dimensão do que as que

têm origem aos 500°C e 600°C e, estando preenchidas, a porosidade diminui relativamente aos valores obtidos à temperatura ambiente.

À temperatura de 500°C houve um aumento significativo de porosidade, de 29% para o GFTE e de 18% para o GATE, em comparação com a temperatura ambiente. O menor aumento da porosidade no GATE pode dever-se ao facto de este já ter uma porosidade inicial mais elevada, tal como se registou na avaliação da capilaridade. Ao contrário dos provetes testados a 400°C, que tiveram uma diminuição de porosidade, estes já tiveram um aumento relevante, o que era previsto segundo a bibliografia referida acima. As fracturas a esta temperatura continuam preenchidas pelo material referido, mas com o aumento de temperatura o seu aumento da largura das fissuras foi superior ao crescimento do material que as preenche, permitindo que a porosidade aumentasse significativamente.

Os provetes sujeitos à temperatura de 600°C tiveram um aumento muito significativo da porosidade, passando de um 1.17% e 1.64% para 3.28% e 4.08%, respectivamente para GFTE e GATE. Este aumento demonstra que há um patamar que se pode definir no comportamento da rocha com a temperatura. Este patamar pode ser identificado ou definido como a temperatura de transformação do quartzo  $\alpha$  para  $\beta$ , cerca de  $573^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Esta transformação leva a um aumento de volume do quartzo devido à mudança da sua estrutura interna e como este tem uma expansão bastante anisótropa pode levar à maior fracturação da rocha, conseqüentemente levando ao aumento drástico da porosidade. Outro factor que pode ter influência no aumento de porosidade é a existência de megacristais de feldspato, na maioria já bastante alterado naturalmente (sericitização) ou mesmo argilizado. Estas alterações no feldspato enfraquecem a sua estrutura, para além dos defeitos cristalinos que estes possuem na sua estrutura (maclas) que com a temperatura tendem a ser os planos preferenciais para fracturar ou mesmo por onde as fracturas se estendem. Outra característica intrínseca ao granito que leva a que seja susceptível ao aquecimento e à expansão térmica dos minerais é o facto de não existir uma matriz a ligar os minerais, que contactam directamente entre si e que mostram alguma abertura quando a rocha está alterada, coincidindo com fracturas ou permitindo que se desenvolvam durante o aquecimento.

Segundo Chen et al. (2016) a porosidade aumenta sempre com o incremento da temperatura. O granito estudado pelo autor tinha uma porosidade de 0.63% inicial e no final a porosidade era de 5.35%, um aumento bastante elevado para o intervalo de temperatura aplicado, de 700°C. O granito analisado no presente estudo tem uma porosidade inicial mais elevada e apresenta com uma porosidade também mais elevada no final dos ensaios, quando comparado com a mesma temperatura testada por Chen et al. (2016). Como é possível verificar no gráfico da Figura 6.3.1, aos 600°C tanto o granito fresco como o alterado têm uma porosidade mais elevada que o granito estudado por Chen et al. (2016).

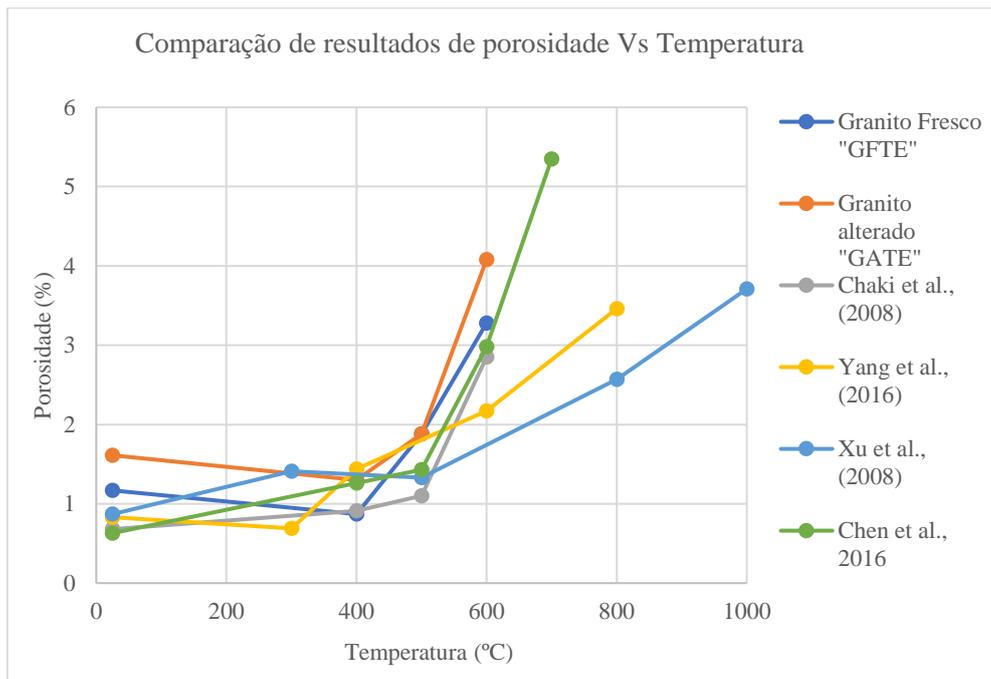


Figura 6.3.1: Comparação da influência da temperatura na porosidade de GFTE e GATE com outros trabalhos sobre granitos.

Outros autores que estudaram a porosidade tiveram resultados semelhantes aos adquiridos no presente trabalho. Chaki et al. (2008) obteve para o granito que estudou uma porosidade inicial de 0.68% e de 2.85% aos 600°C, um aumento bastante significativo, quando apenas 100°C abaixo da temperatura máxima testada a porosidade obtida foi de 1.1%, demonstrando bem o efeito que a temperatura tem no granito quando se atinge os 600°C. No caso de Yang et al. (2016) a porosidade aumentou com a temperatura, verificando também o patamar dos 600°C onde houve um incremento significativo. Este aumento foi, no entanto, bastante inferior a outras amostras aqui referenciados e às amostras em estudo, tendo obtido uma porosidade semelhante ao GATE apenas aos 800°C, como é possível observar no gráfico da Figura 6.3.1. O granito estudado por Xu et al. (2008) teve uma diminuição de porosidade aos 500°C, após ter aumentado significativamente a porosidade aos 300°C. Esta perda de porosidade também foi registada tanto na amostra GFTE como no GATE, mas a uma temperatura inferior, aos 400°C. Contudo, enquanto que nas amostras de Xu et al. (2008) a redução de porosidade ocorreu na passagem dos 300°C para os 500°C, esta manteve-se superior aos valores à temperatura ambiente, como se vê no gráfico acima.

## 6.4 Absorção de água

A capacidade de absorção de água está interligada à porosidade e por isso varia com o tipo de rocha. As rochas que têm uma porosidade muito baixa apresentam absorção de água por parte da rocha muito reduzida. À temperatura ambiente o GFTE teve um valor médio de 0.41 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) enquanto o GATE teve um valor médio mais elevado, de 1.63 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ). Com estes valores iniciais é perceptível

que existe uma diferença entre as duas amostras à temperatura ambiente, em que o GATE absorveu mais água do que o GFTE, provando que a alteração natural que o GATE possui tem influência na porosidade e, por sua vez, na quantidade de água que absorve.

Os provetes GFTE sujeitos à temperatura de 400°C tiveram um aumento significativo na absorção de água, passando de 0.41 para 4.31 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) enquanto o GATE teve um aumento de 1.63 para 7.88 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ). O GFTE mostrou um aumento de 10.51 vezes relativamente à capacidade de absorção de água à temperatura ambiente enquanto o aumento para o GATE foi de 4.83 vezes. Estes valores mostram que a temperatura tem um maior efeito na estrutura do GFTE do que no GATE, quando se compara o aumento em relação à temperatura ambiente.

O patamar dos 500°C teve de novo influência na capacidade de absorção de água nos GFTE e GATE. Esse aumento foi mais significativo no GATE do que no GFTE, já que o primeiro teve um valor médio de absorção de água de 9.26 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) enquanto o segundo teve apenas 7.21 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ). Os valores obtidos para as duas amostras foram bastante próximos, mas quando se compara com a temperatura ambiente, verifica-se de novo que a temperatura teve um maior efeito no GFTE do que no GATE, já que o primeiro absorveu 17.58 vezes mais água do que a 25°C e o segundo apenas mostrou uma absorção de água 5.68 vezes superior.

Os provetes quando sujeitos à temperatura de 600°C apresentaram um aumento de absorção de água muito considerável, passando de uma absorção de 0.41 a 1.63 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ) a 25°C, para uma absorção de 53.85 e 72.95 ( $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ), para GFTE e GATE, respectivamente. É perceptível que a esta temperatura as duas amostras tiveram um aumento bastante notável, 131.34 e 44.75 vezes superior à absorção observada à temperatura ambiente (Tabela 6.4.1).

Tabela 6.4.1: Comparação dos valores médios da absorção de água nas várias temperaturas

<b>Amostras</b>	<b>25°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>GFTE (<math>\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}</math>)</b>	0.41	4.31	7.21	53.85
<b>GATE (<math>\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}</math>)</b>	1.63	7.88	9.26	72.95

Os resultados na Tabela 6.4.1 mostram que a rocha tem um aumento significativo na sua capacidade de absorção de água quando sujeita a temperaturas elevadas, neste caso 400°C e 500°C, mas quando atinge o patamar dos 600°C a rocha ganha uma capacidade de absorção de água muito mais elevada. Como foi referido a porosidade está relacionada com a capacidade de absorção de água da rocha, mas à temperatura de 400°C isto não se verificou já que a porosidade diminui e a absorção de água aumentou.

Ao compilar todos os dados das amostras para cada temperatura foi possível observar o aumento registado tanto nos valores como visualmente. Nos dois gráficos apresentados nas Figuras 5.4.1 e 5.4.2 é perceptível a diferença significativa da absorção da água à temperatura de 600°C em comparação com as restantes temperaturas. No granito fresco verifica-se que se passou de uma absorção de 0.20  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$  a 25°C para 47.35  $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$  a 600°C. Enquanto às temperaturas de 400°C e 500°C os valores estão

bastante próximos, 4.31 e 5.65 g/m<sup>2</sup> \*s<sup>0.5</sup>, respectivamente, e mesmo já sendo valores superiores ao obtido à temperatura ambiente, a discrepância entre os 600°C e as duas temperaturas inferiores é evidente, com valores pelo menos 9 vezes superiores.

O GATE mostrou maior absorção de água do que o GFTE, mas os valores entre os 400°C e 500°C não são tão próximos no GATE como no GFTE e a diferença entre os 600°C e os 500°C é menor, sendo apenas cerca de 5 vezes maior.

A análise dos dois gráficos mostra que existe um patamar entre os 500°C e os 600°C no qual a rocha altera a taxa de absorção de água. O aumento registado entre 400°C e 500°C, que corresponde a uma diferença térmica de 100°C, é pouco significativo, principalmente no GFTE em que a diferença é mínima. Mas quando se observa a mesma diferença térmica de 100°C entre 500°C e 600°C verifica-se um aumento evidente de absorção nas duas amostras, o que mostra que algo se alterou na rocha entre estas duas temperaturas.

Estes diferentes graus de absorção de água registados no ensaio de capilaridade pelas rochas GFTE e GATE, também foi observável à vista desarmada enquanto os ensaios eram realizados. Como referido na secção 5.4, a coluna de água apenas atingiu o topo do provete (saturando toda a rocha) à temperatura de 500°C e 600°C, mas enquanto a 500°C demorou cerca de 24h a saturar, a 600°C os provetes saturaram em apenas 1 hora.

## **6.5 Velocidade da propagação das ondas P e S**

As análises feitas nos GFTE e GATE para a velocidade do som tiveram resultados esperados segundo a literatura (Chen et al., 2017; Zhang et al., 2018). As amostras mostraram uma diminuição na velocidade das ondas P e S, aos 400°C. A redução na velocidade das ondas P foi cerca de 36% e 41%, respectivamente, para GFTE e GATE, enquanto as ondas S tiveram uma redução ligeiramente mais acentuada, 57% e 43%, respectivamente. À temperatura de 500°C as ondas P tiveram uma diminuição na velocidade de 53% e 71% enquanto nas ondas S foi de 50% e 48%, respectivamente. Entre a temperatura de 400°C e 500°C houve um ligeiro abrandamento nas ondas P e S, sendo visível que no GATE as ondas S tiveram um abrandamento na sua velocidade mais acentuado do que no GFTE.

A maior diminuição na velocidade de ambas as ondas, ocorreu à temperatura de 600°C, em que a velocidade atingiu apenas 748 m/s (valor médio) no GFTE e no GATE atingiu os 708 m/s (valor médio). Quando comparados com os valores de velocidade à temperatura ambiente, a redução chega a ser 82% e 80%, respectivamente. Como se verifica a velocidade das ondas P chega a ser menor que 1000 m/s, aproximando-se das velocidades obtidas pelas ondas S, que também atingiram valores muito baixos, de 708 m/s e 466 m/s. A esta temperatura é interessante observar que as velocidades das ondas P e S estão bastante próximas, o que mostra o quão danificada a estrutura do granito está, já que inicialmente a 25°C a diferença entre as velocidades das duas ondas variava entre 1500 m/s a 2000 m/s e, após o aquecimento a 600°C, a diferença entre as ondas P e S é de 200 m/s a 300 m/s. O facto de os

valores serem muito próximos, como é possível observar na Tabela 5.5.4, significa que as características físicas que os diferenciavam a temperaturas inferiores, deixam de existir a 600°C, em especial a presença de fracturas. Aos 600°C que os danos provocados nas duas amostras são semelhantes, já que ambos apresentam valores muito próximos.

Esta diferença registada em ambas as amostras reflecte a heterogeneidade da rocha, que já tinha sido evidenciada na observação macroscópica, assim como a variação do grau de alteração nos vários provetes. Outro factor que leva a que a velocidade tenha tido esta diferença é o facto de as amostras possuírem megacristais de feldspatos com orientações variadas. Como as medições foram feitas segundo o eixo de maior comprimento do provete, as amostras que tinham os megacristais de feldspatos com esta orientação obtiveram uma velocidade mais elevada em ambas as ondas, enquanto os que tinham estes cristais perpendiculares ou com ângulo diferente tiveram um valor mais baixo.

Ao comparar os resultados que se obtiveram neste projecto com dados de outros estudos feitos neste âmbito, verifica-se que estão de acordo com os resultados de Chen et al. (2017), que concluíram que a a velocidade das ondas P diminuí com o aumento de temperatura. Aqueles autores analisaram o comportamento das ondas no granito entre os 100°C e os 700°C com um intervalo de 100°C, tendo conseguido uma melhor definição da diminuição da velocidade com a temperatura. Embora os valores de velocidade obtidos no presente estudo e os de Chen et al. (2017) sejam muito semelhantes (4258.70 m/s e 4142.32m/s respectivamente) a diminuição é mais acentuada no granito aqui estudado. Esta constatação é visível quando se comparam as temperaturas testadas, como é possível verificar na Tabela 6.5.1, mostrando que os valores aqui obtidos são sempre mais baixos.

Tabela 6.5.1: Comparação da velocidade das ondas P nas várias temperaturas.

<b>Velocidade das ondas P</b>			
<b>Amostras</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>	<b>Chen et al. (2017)</b>
<b>400°C</b>	± 2714 m/s	± 2296 m/s	± 3489 m/s
<b>500°C</b>	± 1977 m/s	± 1810 m/s	± 3094 m/s
<b>600°C</b>	± 748 m/s	± 708 m/s	± 1519 m/s

No caso de estudo efectuado por Zhang et al. (2018) com uma velocidade das ondas à temperatura ambiente de 25°C inferior à do granito aqui analisado, cerca de 3500 m/s, o autor obteve sempre valores superiores, para as mesmas temperaturas (400°C, 500°C e 600°C) como é possível verificar na Tabela 6.5.2. Isto mostra que em todas as temperaturas o granito em estudo teve uma maior degradação, conseqüentemente mais fracturas que o granito estudado por Zhang et al. (2018). Os valores obtidos aos 600°C neste projecto são equivalentes aos valores obtidos por aqueles autores quando o granito foi sujeito à temperatura de 800°C.

Tabela 6.5.2: Comparação da velocidade nas ondas P nas várias temperaturas.

<b>Velocidade das ondas P</b>			
<b>Amostras</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>	<b>Zhang et al. (2018)</b>
<b>400°C</b>	± 2714 m/s	± 2296 m/s	± 2000 m/s
<b>500°C</b>	± 1977 m/s	± 1810 m/s	± 1500 m/s
<b>600°C</b>	± 748 m/s	± 708 m/s	± 1000 m/s
<b>800°C</b>	Desintegração	Desintegração	±750 m/s

## 6.6 Resistência à tracção

Como é possível verificar no gráfico da Figura 6.6.1, os valores obtidos para o GFTE e o GATE à temperatura ambiente tem uma diferença que era espectável. Esta diferença vai diminuindo com o aumento da temperatura. Por sua vez é possível verificar que aos 400°C o GATE apresenta uma maior resistência à tracção do que o GFTE, o que pode dever-se a uma maior porosidade do primeiro, permitindo aos minerais ter mais espaço para expandir sem originar novas fracturas na estrutura do granito do que no GFTE. Na temperatura de 600°C verifica-se de novo uma maior resistência do GATE em relação ao GFTE, o que é atribuído ao facto de uma das amostras ter mostrado uma resistência significativamente superior às outras, o que fez com que a média aumentasse, mas a diferença de valores é menor para a mediana. O facto de ambas as amostras terem um comportamento semelhante aos 600°C indica que as diferenças que tinham a temperaturas inferiores (porosidade e número de fracturas), deixaram de ser significativas, levando a que tenham o mesmo comportamento quando colocadas sob tracção.

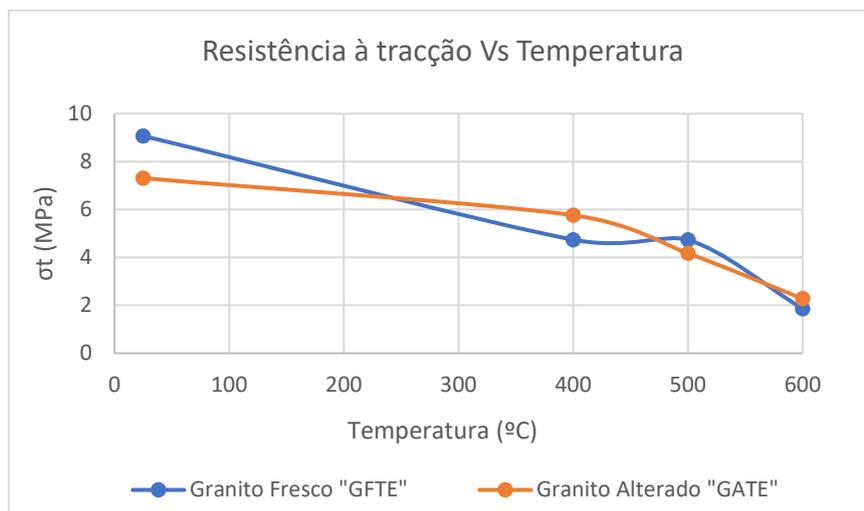


Figura 6.6.1: Comparação dos pontos de rotura de GFTE-B e GATE-B às diferentes temperaturas.

Todas as amostras fracturaram da mesma maneira às diferentes temperaturas, fracturando no centro da amostra, paralelamente à direcção da compressão. Nas amostras correspondentes a 25°C e 400°C observa-se a rotura típica por tracção nos materiais contínuos e isotrópicos. As amostras sujeitas a

500°C e 600°C em que o número de fracturas era elevado, havendo zonas em que as fracturas atravessavam praticamente a superfície da amostra, o comportamento manteve-se o mesmo, fracturando paralelamente à direcção de maior compressão. Isto significa que as fracturas perpendiculares, paralelas ou obliquas à direcção de maior compressão não tiveram qualquer influência na fracturação. Por sua vez, nas duas últimas temperaturas a fracturação não foi instantânea, pelo contrário, foi gradual, podendo ouvir-se o som da rocha a ceder lentamente, com início lento da fracturação antes de ceder por completo.

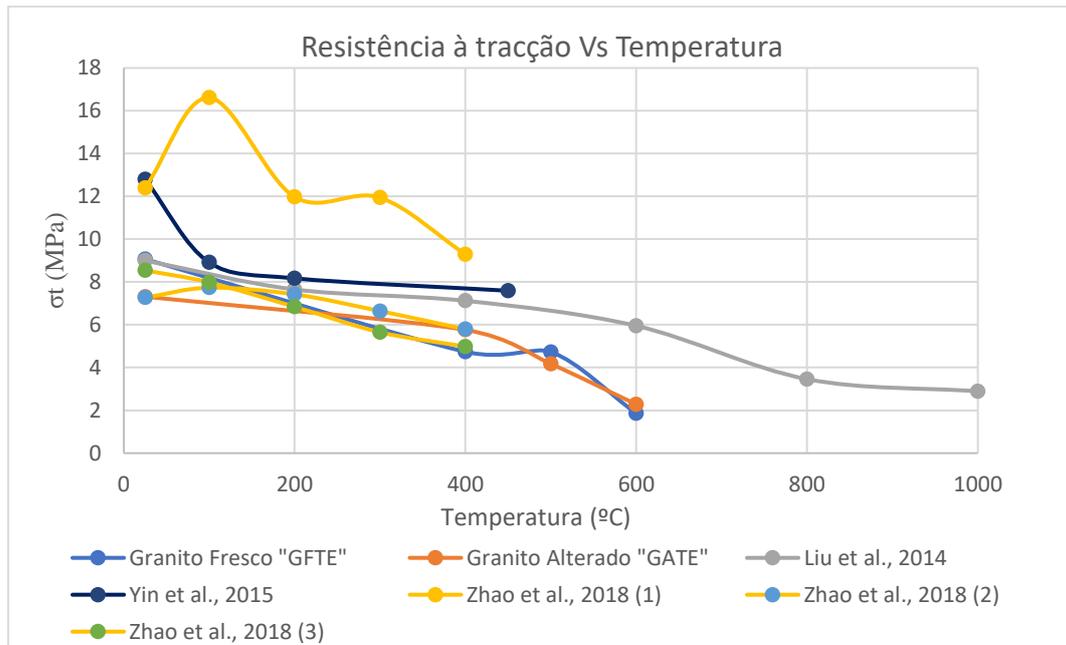


Figura 6.6.2: Comparação da resistência à tracção das amostras em estudo com resultados obtidos na literatura referida.

A comparação dos resultados obtidos para as amostras GFTE e GATE com os publicados noutros trabalhos com ensaios em condições semelhantes (gráfico da Figura 6.6.2), permite concluir que a relação inversa entre a resistência à tracção e a temperatura é coerente, já que em todos os trabalhos se verifica que o aumento da temperatura conduz à diminuição da resistência. Zhao et al. (2018), que ensaiaram 3 granitos diferentes, verificaram que todos perderam resistência com o aumento de temperatura, exceptuando uma amostra que, aos 100°C teve um ligeiro aumento da resistência, para a seguir aos 200°C obter valores inferiores aos registados a 25°C. No entanto, nenhum dos três granitos teve exactamente o mesmo comportamento, o que explica como a composição, a homogeneidade, a granularidade e a porosidade têm influência directa no comportamento da rocha.

Liu et al. (2014) ensaiaram granito até uma temperatura bastante superior à utilizada neste trabalho, 1000°C. No presente trabalho, observou-se a desintegração das amostras de granito fresco e alterado para temperaturas superiores a 650°C. A baixa resistência registada nos GFTE e GATE a 600°C pode dever-se à presença dos megacristais de feldspato que são pontos de fraqueza na estrutura do granito. A grande abundância de quartzo que sofre a transformação de  $\alpha$  para  $\beta$  faz com que a taxa de expansão e de retracção seja elevada, produzindo novas fracturas e enfraquecendo a estrutura do granito.

Yin et al. (2016) estudaram um granito e observaram uma queda de resistência significativa aos 100°C e uma diminuição para temperaturas até aos 400°C. Embora com taxas de variação variáveis, nesse estudo o decréscimo foi muito menos acentuado para temperaturas próximas de 400°C. Isto mostra que o mesmo tipo de rocha, com algumas características diferentes de granularidade, porosidade, composição e fracturação pode apresentar algumas variações no seu comportamento.

## **6.7 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade**

As amostras GFTE e GATE apresentaram comportamentos diferentes nas temperaturas testadas, como é possível certificar no gráfico da Figura 6.7.1. A amostra GATE teve um incremento da resistência à compressão uniaxial aos 400°C e só após esta temperatura ocorreu uma redução na resistência, mas a resistência à compressão uniaxial do GFTE, pelo contrário, diminuiu desde a primeira temperatura a que esteve exposto.

O granito alterado (GATE) teve uma resistência à compressão uniaxial mais baixa, inferior em 30%, ao valor observado para o granito fresco GFTE, possivelmente devido à alteração sofrida pelos agentes erosivos naturais que enfraqueceram a sua estrutura. Por isso a diferença registada entre ambos era expectável.

Com o incremento da temperatura ambas as amostras deveriam ter tido uma redução na sua resistência, já que na maioria dos casos estudados na literatura (Török e Török, 2016; Chen et al., 2016) houve sempre uma diminuição da resistência para temperaturas iguais ou superiores a 400°C. No presente estudo, tal como no estudo de Török e Török (2016) e de Zhao et al. (2018) observou-se aos 400°C um incremento da resistência na amostra GATE, cerca de 14% em relação à temperatura ambiente. O mesmo se verificou para a temperatura de 500°C, embora a uma taxa inferior (9%). Para se obter um valor inferior ao obtido à temperatura ambiente foi preciso atingir a temperatura de 600°C, para a qual o GATE apresenta uma  $\sigma_c$  de 46.37 MPa, que corresponde a uma redução de 37% da resistência à compressão uniaxial a 25°C. A amostra GFTE, por sua vez, teve um comportamento regular (gráfico da Figura 6.7.1), isto é, o seu ponto de rotura foi obtido consecutivamente com menos carga ao longo das três temperaturas testadas (400°C, 500°C e 600°C). A diminuição da resistência à compressão uniaxial foi de 29%, 44% e 65%, respectivamente.

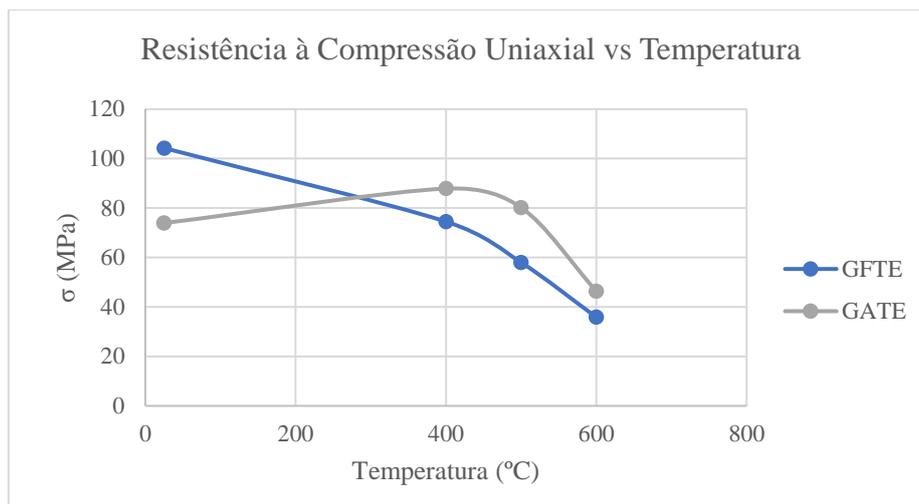


Figura 6.7.1: Comparação da resistência à compressão uniaxial entre o GFTE e o GATE para as várias temperaturas.

Chen et al. (2017) testaram granitos submetidos a várias temperaturas (200°C, 400°C, 600°C, 800°C e 1000°C) e analisaram com detalhe o comportamento dos mesmos com o incremento da temperatura. Verificaram que o incremento na resistência da compressão uniaxial observado para 200°C, é devido à diminuição da porosidade, o que provoca um aumento na resistência.

Zhao et al. (2018) colocaram o granito Strathbogie sob várias temperaturas e testaram a resistência à compressão uniaxial. Os autores dividiram a amostra consoante a dimensão do grão, definindo provetes de grão fino, médio e grosseiro. Comparando os valores do granito Strathbogie grosseiro com os de GFTE e GATE é possível concluir que existe uma semelhança entre o GATE e o granito de grão grosseiro de Zhao et al. (2018). Em ambos os casos há um incremento de resistência, que é superior à resistência obtida a 25°C. Como se verificou no GATE houve um incremento de cerca de 14% enquanto no granito grosseiro ensaiado por Zhao et al. (2018) o incremento foi de 23%. Török et al. (2016), que ensaiaram dois granitos à compressão uniaxial, obtiveram resultados similares aos registados no presente trabalho. Uma das amostras teve um incremento da resistência com o aumento da temperatura até 300°C enquanto a outra não mostrou alteração no valor da resistência, mas ambas apresentaram uma diminuição bastante significativa quando sujeitas à temperatura de 600°C (gráfico da Figura 6.7.2), como aconteceu com as amostras GFTE e GATE, mesmo considerando uma diferença de 100°C na primeira temperatura testada, em relação a este trabalho, A Figura 6.7.2. ilustra os comportamentos acabados de referir.

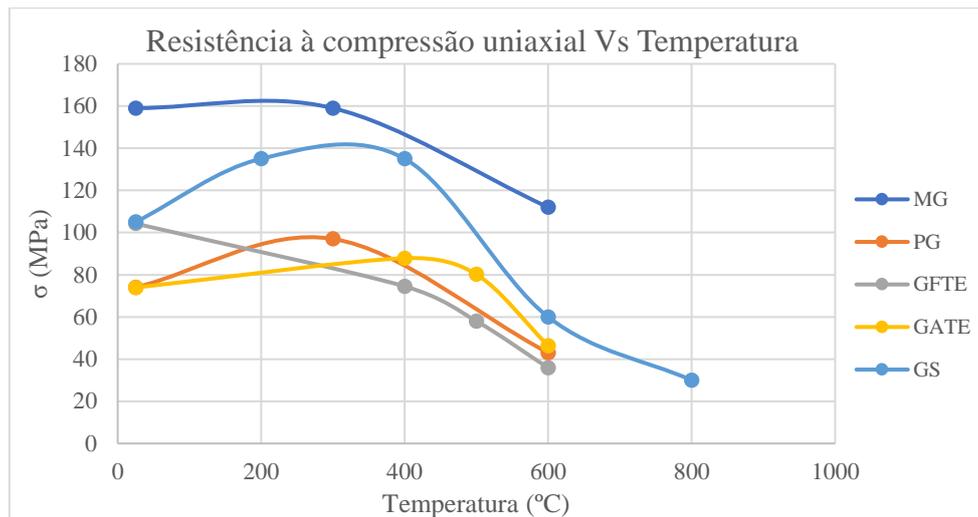


Figura 6.7.2: Resistência à compressão uniaxial de GATE, GFTE em comparação com outros trabalhos publicados. MG – Mauthasen granite (Török et al., 2016), PG - Patrick granite (Török et al., 2016) e GS - granito Strathbogie (Zhao et al., 2018).

A possível explicação para o incremento da resistência à compressão uniaxial registrado na amostra GATE à temperatura de 400°C e 500°C, é a presença de preenchimento nas fracturas por um material amorfo neoformado aquando do aquecimento. Este material amorfo provém dos óxidos existentes previamente nas fracturas, já que como o aquecimento e arrefecimento é feito a uma velocidade demasiado rápida para que se formem estruturas mineralógicas ficando apenas uma massa amorfa sem uma estrutura definida que cresce com as fracturas, selando-as e assim diminuindo a porosidade da rocha que, por consequência, se torna mais resistente à compressão uniaxial. À temperatura de 500°C há um aumento da dimensão e extensão das fracturas que se sobrepõe ao efeito do preenchimento pelo material amorfo e isso causa uma ligeira diminuição dos valores de resistência, mas mesmo assim superiores aos registada a 25°C. No caso da amostra GFTE, que não registou qualquer incremento na resistência à compressão uniaxial, o efeito do preenchimento não se verificou, dado que apenas algumas fracturas estavam preenchidas por calcite. Sem preenchimento, as fracturas aumentaram de espessura e extensão, incrementando assim a porosidade e diminuindo a resistência do granito à compressão uniaxial. A calcite presente nas fracturas não acompanhou o crescimento das mesmas, não se dando assim o mesmo efeito que ocorreu no GATE com o material amorfo.

Os provetes sujeitos à compressão uniaxial a 25°C (Figura A8.1, em anexo) mostram que a rocha tem um comportamento quase perfeitamente linear e que os 2º e 3º ciclo de cada ensaio quase se sobrepõem, corroborando os valores obtidos para E e  $\nu$ . Os provetes de GFTE têm valores mais elevados de resistência do que os GATE e menor deformabilidade, com valores de módulo de elasticidade mais elevados do que o GATE. As Figuras A.8.2, A8.3 e A8.4 (em anexo) mostram que a linearidade registada a 25°C se vai perdendo com o aumento de temperatura. Aos 400°C (Figura A8.2) o GFTE mantém a sua linearidade durante os ciclos, enquanto o GATE já não possui a linearidade referida

anteriormente. A partir dos 500°C quer o GFTE quer o GATE têm o mesmo comportamento não linear. Por sua vez, ao observar os gráficos (Figuras A8.1 até A8.4) verifica-se que não existe variação no coeficiente de Poisson dinâmico.

O módulo de elasticidade (estático e dinâmico) do granito diminuiu com o incremento da temperatura, em ambas as amostras os valores foram sempre diminuindo com a temperatura, mostrando assim a relação inversa entre este parâmetro e a temperatura. A diferença entre o GFTE e o GATE à temperatura ambiente deve-se ao grau de alteração. Aos 400°C houve um decréscimo no módulo de elasticidade em ambos, como é possível observar no gráfico da Figura 6.7.3. O efeito da temperatura neste parâmetro foi superior no GFTE, que à temperatura ambiente tinha valores superiores ao GATE e após o aquecimento à primeira temperatura obteve valores inferiores aos registados no GATE. O mesmo sucedeu para a temperatura de 500°C, mas neste caso os valores ficaram mais próximos um do outro. A redução do módulo de elasticidade da primeira temperatura testada para a segunda foi relevante, passando de 24.85 MPa para 13.79MPa e de 18.37 MPa para 11.9 MPa. Na última temperatura testada (600°C) as duas amostras tiveram valores mais baixos para este parâmetro. Ao analisar o gráfico da Figura 6.7.3 verifica-se que o decréscimo na amostra GFTE foi mais acentuado que o GATE e que em ambos a temperatura tem influência no módulo de elasticidade.

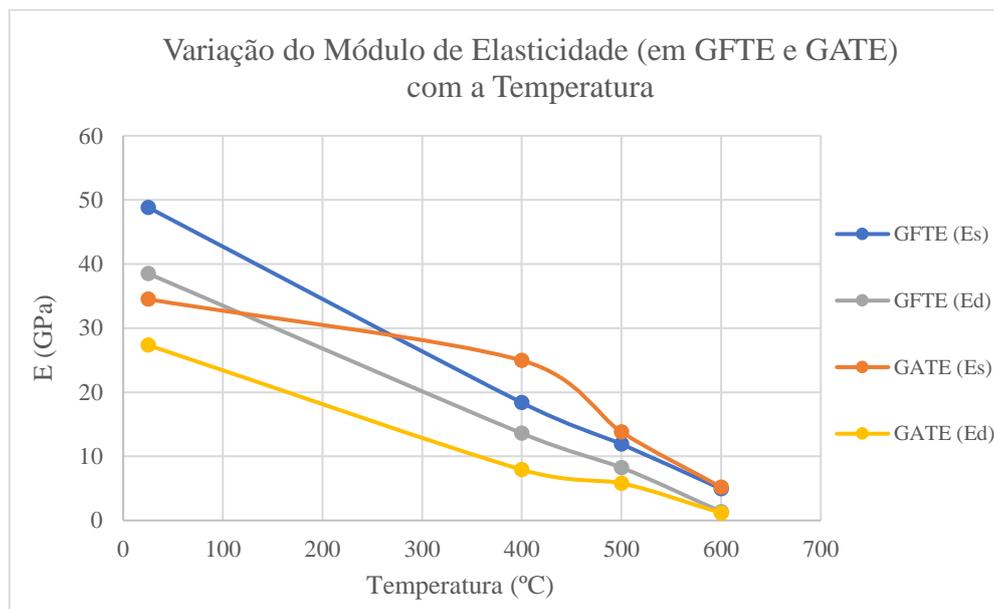


Figura 6.7.3: Variação do módulo de elasticidade para o GFTE e o GATE nas temperaturas testadas.

No gráfico da Figura 6.7.4, comparam-se os resultados obtidos nas amostras GFTE e GATE com granitos ensaiados por outros autores (Chen et al., 2016; Yang et al., 2016 e Yin et al., 2016), e conclui-se que o módulo de elasticidade da rocha tende sempre a diminuir com o aumento da temperatura. É visível que a diminuição neste parâmetro é ligeira em todos as amostras excepto no GFTE, que como se pode ver é o único para o qual a recta tem um declive mais acentuado, enquanto

todos os outros até aos 400°C tem um declive bastante mais suave, apresentando apenas um declive mais acentuado na recta entre os 400°C e 500°C. Para a temperatura de 600°C, de acordo com os dados obtidos, o valor do módulo de elasticidade para o granito diminui drasticamente.

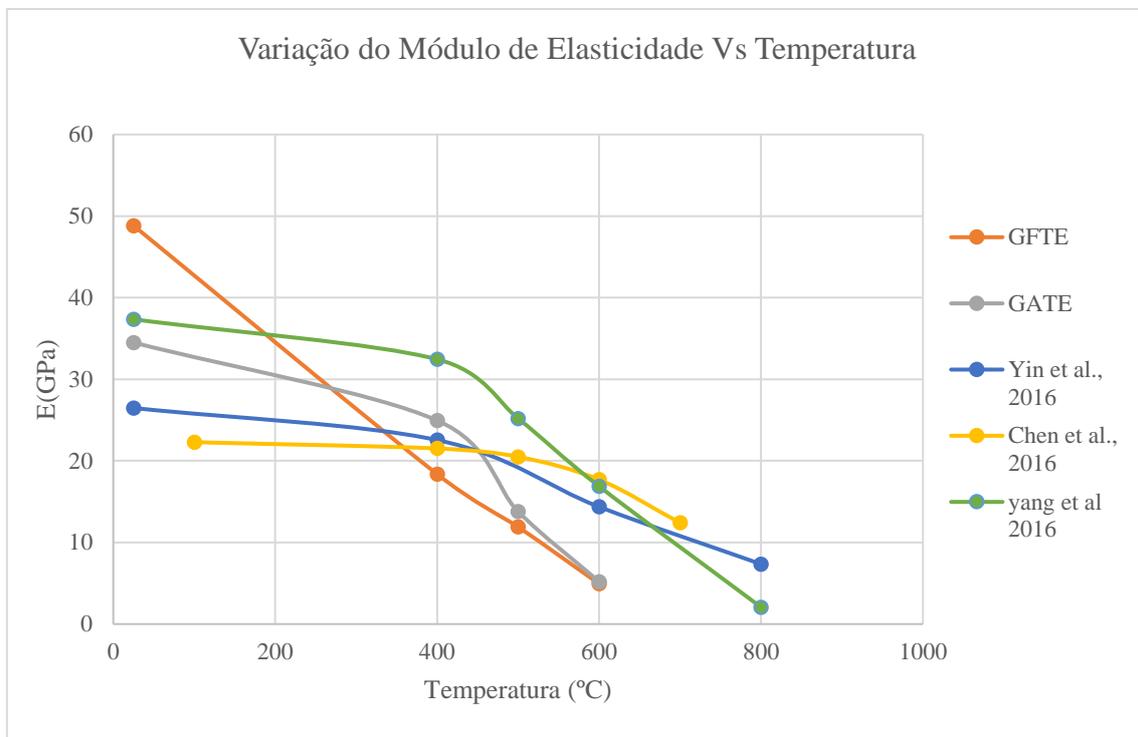


Figura 6.7.4: Comparação do módulo de elasticidade de GFTE e GATE com outras amostras estudados na literatura.

Comparando o módulo de elasticidade estático e dinâmico conclui-se que estes não apresentam valores semelhantes, mas comportam-se da mesma maneira com o incremento da temperatura. O coeficiente de Poisson estático e dinâmico tem comportamentos diferentes, o estático tende a diminuir com o aumento da temperatura enquanto o dinâmico parece não ser tão afectado como o estático. Como é possível verificar no gráfico da Figura 6.7.5 o coeficiente de Poisson estático diminui drasticamente logo na primeira temperatura, tanto para GFTE como o GATE, enquanto o dinâmico aumenta com a primeira temperatura testada (400°C). O dinâmico mantém-se sempre com valores superiores aos obtidos à temperatura ambiente, exceptuando no GFTE que à temperatura de 600°C tem um coeficiente de Poisson menor que a 25°C.

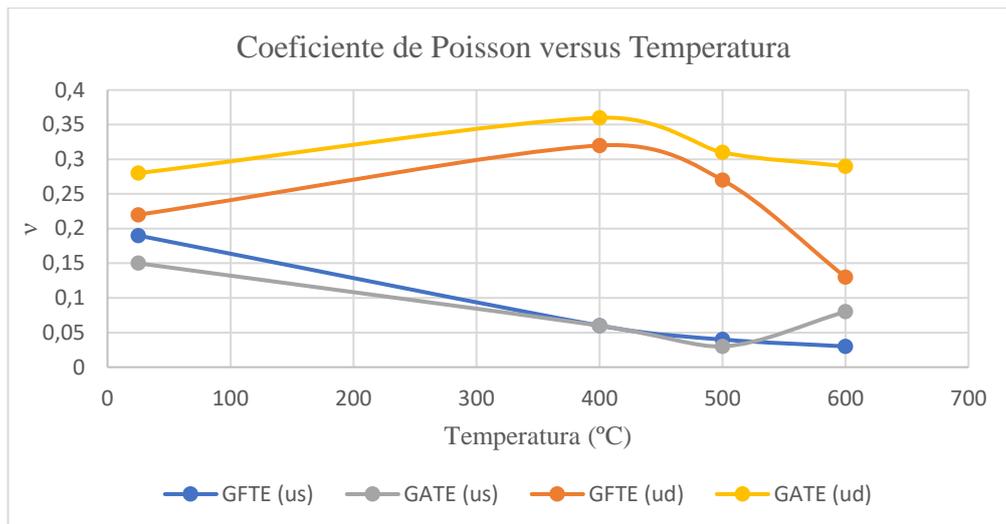


Figura 6.7.5: Coeficiente de Poisson estático e dinâmico para o GFTE e o GATE.

A resistência à compressão diminui e a deformabilidade aumenta, com o aumento da temperatura. Os gráficos representados (Figuras 6.7.1 a 6.7.5), mostram a influência da temperatura nas propriedades da rocha.

## 6.8 Cor

Os resultados obtidos nos três parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) no capítulo 5.8, mostram que as amostras sofreram alteração na cor com o aumento da temperatura. Os parâmetros que mais variaram em ambas as amostras foram o  $a^*$  e o  $b^*$ , enquanto o  $L^*$  teve menor variação de valores. Para se comprovar que existe esta alteração e que esta é visível à vista desarmada existe o parâmetro  $\Delta E^*$ , que segundo Prieto et al. (2010) diz que quando o  $\Delta E^* > 2$  a alteração da cor é visível à vista desarmada e por isso indica que o aquecimento provocou alterações na cor da rocha.

A Tabela A9.2 (em anexo) apresenta os valores de  $\Delta E^*$  para o GFTE e o GATE para as três temperaturas testadas. É perceptível que não existe qualquer padrão que se possa definir com o aumento da temperatura, já que os valores variam bastante nas várias temperaturas em ambas as amostras. No GFTE observa-se que logo em todas as temperaturas foi superado o valor definido como limite inferior para que a alteração na cor seja visível à vista desarmada ( $\Delta E^* > 2$ ). No GATE houve de novo uma grande variação nos valores de  $\Delta E^*$ , mas ao contrário do que se passou no GFTE, neste granito os valores mais altos foram registados à temperatura mais elevada. Como o valor de todas as amostras superou o valor mínimo referido é considerado que as amostras sofreram dano estético (aesthetic damage), segundo o Pietro et al. (2010) (Figura 6.8.1).

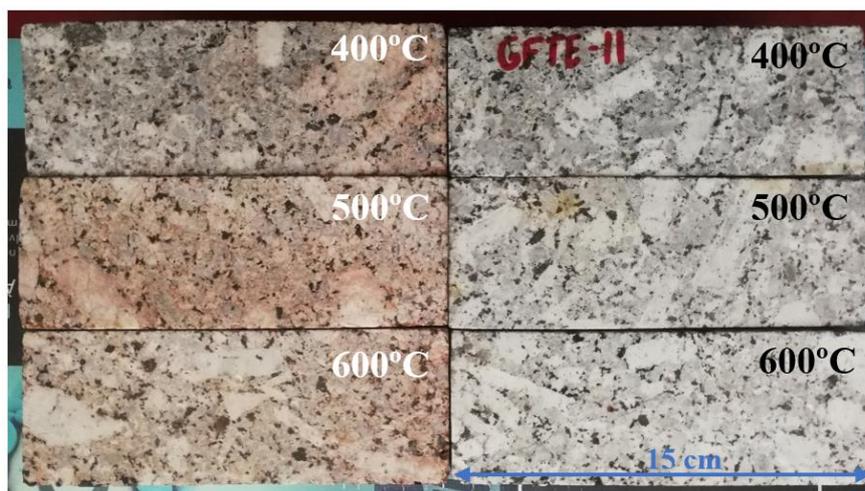


Figura 6.8.1: Alteração de cor visível à vista desarmada para as diferentes temperaturas testadas para o GFTE (à direita) e o GATE (à esquerda).

No Figura 6.8.1 estão representados os GATE e os GFTE ao longo das temperaturas utilizadas. Conclui-se que a alteração de cor registada pelo colorímetro é visível à vista desarmada, como comprova o parâmetro  $\Delta E^*$ , evidenciado na Tabela 6.8.1.

Tabela 6.8.1: Comparação do  $\Delta E^*$  nas várias temperaturas para o GFTE e GATE.

Variação do parâmetro de cor				
Temperatura	Amostras	$\Delta E^*$	Amostras	$\Delta E^*$
400°C	GFTE-3	7.96	GATE-1	3.85
	GFTE-7	3.43	GATE-7	7.03
	GFTE-11	5.76	GATE-10	9.13
500°C	GFTE-2	4.49	GATE-5	4.45
	GFTE-9	4.99	GATE-9	6.46
	GFTE-10	4.04	GATE-11	5.78
600°C	GFTE-4	7.03	GATE-2	11.03
	GFTE-12	7.03	GATE-12	7.25
	GFTE-13	3.79	GATE-13	10.33

Nos GFTE identifica-se a temperatura a que cada provete esteve sujeito, já que este tende a ficar cada vez mais claro com o aumento da temperatura. Ao observar a imagem, percebe-se que o GFTE-11 foi sujeito à temperatura de 400°C, enquanto o GFTE-9 a 500°C e o GFTE-4 a 600°C. Por sua vez no GATE é impossível distinguir a que temperatura o provete esteve exposto, já que a variação de cor é muito mais aleatória que no GFTE. Ao analisar a cor dos provetes o GATE-9 aparenta ter sido sujeito à temperatura de 600°C, porque apresenta uma cor mais avermelhada, mas na realidade apenas foi sujeito à temperatura de 500°C. Entre as duas amostras é mais fácil analisar o GFTE do que o GATE, já que como o segundo tem alteração natural a sua cor depende do grão de alteração.

Esta alteração visível na cor é o resultado de todas as modificações ou alterações registadas na mineralogia, já que no caso do GATE é mais evidente a mudança da cor devido à existência de preenchimento por óxidos, que se transforma num material amorfo com o aumento da temperatura e tende a dispersar pelas fracturas neoformadas e por toda a rocha.

## Considerações finais

O granito em estudo, dividido em duas amostras que diferem no grau de alteração (granito fresco, GFTE, e granito alterado, GATE), foi sujeito a três temperaturas pré-definidas, 400°C, 500°C e 600°C, para avaliar o efeito da temperatura nas características petrográficas, físicas e mecânicas da rocha.

A paragênese mineral do granito é quartzo, plagioclase, feldspato potássico, biotite e, em menor percentagem, moscovite e minerais acessórios, não havendo neoformação de minerais devido ao aquecimento. Ao microscópio verificou-se um aumento significativo de fracturas, tanto intragranulares como intergranulares, em espessura e extensão. O material de preenchimento das fracturas do GATE, que expandiu com o incremento da temperatura, foi analisado à microsonda electrónica concluindo-se que é um produto amorfo constituído por silício, alumínio, ferro e magnésio. Este produto origina a coloração avermelhada observada no GATE com o aquecimento.

Os cristais de biotite apresentam, na sequência da exposição às temperaturas de ensaio, orlas negras, que por vezes cobrem totalmente os cristais. Ocorre a diminuição de potássio, com perda por vezes total, e o mineral perde a estrutura cristalina. Verifica-se ainda a oxidação de  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$  na composição do mineral.

O quartzo, com o incremento da temperatura, expande gradualmente até atingir os 3.66% aos 570°C, e instantaneamente em cerca de 0.79% a esta temperatura, contraindo durante o arrefecimento. Esta expansão instantânea é a consequência da transformação estrutural do quartzo  $\alpha$  em  $\beta$  e a inversão com a consequente retracção, causando o enfraquecimento na estrutura da rocha devido à criação de fracturas e propagação das existentes. Por outro lado, o granito estudado contém abundantes megacristais de feldspato potássico que, embora apresente uma expansão térmica inferior à do quartzo, de cerca de 0.9%, devido às suas dimensões (30 a 70 mm) têm influência na formação de fracturas na rocha.

A porosidade das amostras GFTE e GATE aumenta com a temperatura, em especial quando são expostas a 600°C, ou seja, o aumento é muito mais acentuado entre 500°C e 600°C, o que deverá ser devido ao aumento do número e dimensões das fracturas já referido. O aumento total da porosidade, comparando os valores a 600°C com os iniciais, a 25°C, é superior para o granito fresco (180%) relativamente ao alterado (149%).

A massa volúmica do granito tende a diminuir com o aumento da temperatura em ambas as amostras, em especial quando expostas a 600°C. A diminuição por comparação com os valores obtidos a 25°C é de 3% para o GFTE e de 4% para o GATE.

A absorção de água aumentou consistentemente com o incremento da temperatura. Também para esta propriedade o incremento é mais relevante ao atingir 600°C, verificando-se que o GFTE

apresentou uma absorção de água 131.34 vezes superior à registada à temperatura ambiente, enquanto o valor obtido no GATE foi 44.75 vezes superior ao inicial.

O aumento de porosidade das amostras com o aumento da temperatura refletiu-se também na velocidade de propagação das ondas P e S, que registaram um decréscimo da ordem de 80% para GFTE e GATE.

A resistência à tracção do granito tende a diminuir com o aumento da temperatura, já que em todas as análises feitas o valor obtido foi inferior ao inicial. Aos 600°C registou-se a maior queda na resistência do GFTE e GATE, obtendo-se no final uma redução de cerca de 80% e 69%, respectivamente, relativamente aos valores obtidos a 25°C.

A resistência à compressão uniaxial decresceu em ambos os granitos com o incremento da temperatura, embora com valores ligeiramente mais elevados a 400°C relativamente aos resultados de referência, a 25°C. Comparando os valores obtidos à temperatura ambiente e a 600°C, verifica-se que houve um decréscimo de 66% para o GFTE e de 37% para o GATE na resistência à compressão uniaxial. Adicionalmente, dois provetes foram expostos a 700°C e 800°C, observando-se a desintegração dos mesmos. Conclui-se, assim, que a temperatura crítica para esta rocha é 600°C pelo que o material sujeito a esta temperatura não deverá ser reutilizado para fins estruturais e ornamentais tanto a curto prazo como a longo prazo.

O módulo de elasticidade do granito diminui com o incremento da temperatura. Em ambas as amostras, GFTE e GATE, o módulo diminui significativamente entre o ensaio à temperatura de 400°C e a 600°C, com um decréscimo de 90% no GFTE e de 85% no GATE. O coeficiente de Poisson também diminui significativamente com a temperatura em ambas as amostras, em cerca de 84% no GFTE e de 47% no GATE.

Verifica-se que as propriedades mecânicas de ambas as amostras decrescem acentuadamente com a temperatura, mas que este decréscimo é mais significativo na amostra de granito fresco na qual a temperatura tem um efeito substancialmente maior, esta diferença deve-se ao facto de o granito alterado apresentar uma porosidade maior, o que permite que a expansão térmica dos minerais não tenha a mesma influência que no granito fresco. Em todas as características avaliadas, a maior variação ocorre entre 500°C e 600°C devido à alteração do quartzo a 573°C, originando quartzo β e, possivelmente, à expansão dos abundantes megacristais de feldspato.

O GFTE teve uma ligeira alteração de cor com o aquecimento, visível à vista desarmada ( $\Delta E > 2$ ) mas é no GATE que se observa a maior alteração de cor na rocha, já que esta passa de tons amarelados a tons vermelhos, o que se atribui à forte oxidação do ferro presente nos preenchimentos das fissuras. Registou-se alguma dificuldade para diferenciar os provetes de GATE submetidos a 500°C dos aquecidos a 600°C, o que leva a concluir que a partir dos 400°C é difícil usar a cor para estimar de temperatura de exposição.

## **Trabalhos futuros**

Comparando o trabalho desenvolvido com outros publicados, verifica-se que existem ainda vários aspectos que é necessário esclarecer no estudo do efeito de incêndios de grandes proporções sobre as rochas.

Apontam-se como possíveis caminhos a seguir nesta temática: o estudo de um conjunto vasto de granitos de granularidade diferente com o objectivo de esclarecer a sua influência no comportamento mecânico face a temperaturas elevadas; a selecção de diferentes rampas de aquecimento que mais se aproximem do que sucede durante um incêndio; a utilização de métodos que provoquem o arrefecimento rápido, simulando a água utilizada na extinção dos incêndios, analisando a sua influência sobre as características mecânicas das rochas; a quantificação da fracturação antes a após a aplicação da temperatura e, eventualmente, a realização de tomografia computadorizada de modo a analisar a porosidade criada pela exposição a temperatura elevada.

## Referências Bibliográficas

- Beck, K., S. Janvier-Badosa, X. Brunetaud, Á Török, and M. Al-Mukhtar. 2016. Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 20 (6):643-55. doi: 10.1080/19648189.2015.1035804
- Brotóns, V., R. Tomás, S. Ivorra, and J. C. Alarcón. (2013) Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's Calcarenite. *Engineering Geology* 167:117-27 doi:10.1016/j.enggeo.2013.10.012.
- Chaki, S., Takarli, M., & Agbodjan, W. P. (2008). Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1456–1461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.002>
- Chakrabarti, B., T. Yates, and A. Lewry. (1996). Effect of fire damage on natural stonework in buildings. *Construction and Building Materials* 10 (7):539–44. doi:10.1016/0950-0618(95)00076-3.
- Chen, S., Yang, C., & Wang, G. (2017). Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1533–1542. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.075>
- Dean, S. W., Takarli, M., & Prince-Agbodjan, W. (2008). Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage. *Journal of ASTM International*, 5(3), 100464. <https://doi.org/10.1520/jai100464>
- Dionísio, A., M. A. Sequeira Braga, and J. C. Waerenborgh. 2009. Clay minerals and iron oxides-oxyhydroxides as fingerprints of firing effects in a limestone monument. *Applied Clay Science* 42 (3–4):629–38. doi:10.1016/j.clay.2008.05.003.
- EFFIS, 2017 - Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa. Joint Research Center - Technical Reports, European Union, 2018.
- Koca, M. Y., G. Ozden, A. B. Yavuz, C. Kincal, T. Onargan, and K. Kucuk. 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (4):520–30. doi:10.1016/j.ijrmms.2005.09.007.
- Fan, L. F., Wu, Z. J., Wan, Z., & Gao, J. W. (2017). Experimental investigation of thermal effects on dynamic behavior of granite. *Applied Thermal Engineering*, 125, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.007>
- Gautam, P. K., Verma, A. K., Jha, M. K., Sharma, P., & Singh, T. N. (2018). Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 460–474. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.07.018>
- Gómez Heras, M. (2005). *Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico*.
- Götze J., Möckel R. (2012) - Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics, Springer, 2-21.
- Hajpál, M., and Á. Török. 2004. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology* 46:311–22. doi:10.1007/s00254-004-1034-z.
- Liu S., Xu J. (2014) Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment. *International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 71:188-193.
- Jaeger J. C., Cook N. G. W., and Zimmerman R. W. (2006)- *Fundamentals of Rock Mechanics*. Blackwell Publishing USA, Chapter 4, pages 80-90.
- Martinho, E., and Dionísio, A. (2018). Assessment Techniques for Studying the Effects of Fire on Stone Materials: A Literature Review. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1535008>
- Prieto B, Sanmartín P, Silva B, Martínez-Verdú F. Measuring the color of granite rocks: a proposed procedure. *Color Res Appl* 2010;35(5):368–75.
- Pires, V., Rosa, L. G., & Dionísio, A. (2014). Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel-hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*,

64, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.035>

- Sanz, J., González-Carreño, T., Gancedo, R. (1983) - On Dehydroxylation Mechanisms of a Biotite in Vacuo and in Oxygen. *Physics and chemistry of minerals*, 9:14-18.
- Shao, S., Ranjith, P. G., Wasantha, P. L. P., & Chen, B. K. (2015). Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy. *Geothermics*, 54, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.11.005>
- Skinner J. B. (1966) - Thermal Expansion. *Handbook of Physical Constantes*, section 6, 78-96.
- Teixeira, C., Carvalhosa, A. P. L. M. C. A., Ferro, N. M. (1963)– Carta e respetiva Notícia Explicativa da Carta geológica de Portugal na escala 1:50 000 – Folha 18-A (Vila Franca Das Naves). Serviços geológicos de Portugal, Lisboa.
- Török, A., & Török, Á. (2016). The effect of temperature on the strength of two different granites. *Central European Geology*, 58(4), 356–369. <https://doi.org/10.1556/24.58.2015.4.5>
- Vazquez, P., Acuña, M., Benavente, D., Gibeaux, S., Navarro, I., & Gomez-Heras, M. (2016). Evolution of surface properties of ornamental granitoids exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 104, 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.051>
- Wang, X.-Q., Schubnel, A., Fortin, J., Guéguen, Y., & Ge, H.-K. (2013). Physical properties and brittle strength of thermally cracked granite under confinement. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(12), 6099–6112. doi:10.1002/2013jb010340
- Winkler, M. E. 1997- Stone in Architecture: Properties, Durability. Springer Berlin Heidelberg.
- Wolton Mike, B., Gould, S. J., McCaw L. W., Cheney P. N., Taylor W. S. (2012). Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. *International Journal of Wildlan Fire* 2012,21,270-281.
- Xu, X. li, Gao, F., Shen, X. ming, & Xie, H. ping. (2008). Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(3), 413–417. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60086-3](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60086-3)
- Yang, S. Q., Ranjith, P. G., Jing, H. W., Tian, W. L., & Ju, Y. (2017). An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics*, 65, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.09.008>
- Yin, T. bing, Shu, R. hua, LI, X. bing, WANG, P., & LIU, X. ling. (2016). Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 26(7), 1926–1937. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64311-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64311-X)
- Zehfuss, J., Hossler, D. (2006)- A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire safety journal* 42 (2007) 115-126.
- Zhao Z., Liu Z., Pu H., Li X. (2018) Effect of Thermal Treatment on Brazilian Tensile Strength of Granite with Different Grain Size Distributions. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51\_1293-1303
- Zhang F., Zhao J., Hu D., Skoczylas F., Shao J. (2018). Laboratory Inverstigation on Physical and Mechanical Properties of Granite After Heating and Water-Cooling Treatment. *Rock Mech Rock Eng* 51:677-694. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1350-8>

### Normas e Recomendações

- EN 1925:1999. Determination of water absorption coefficient by capillarity. *British Standard*
- ISRM, (1972). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.1-12*.
- ISRM. 1978a. Suggested Methods for Determining Sound Velocity- *Int. J. Rocj Mech. Min. Sci. & Gromech. Abstr. Vol.15, pp. 53-58*.
- ISRM, 1978b. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials - *Int. J. Rocj Mech. Min. Sci. & Gromech. Abstr. Vol.15, pp. 99-103*.

*ISRM, 1979. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials -  
Int. J. Rocj Mech. Min. Sci. & Gromech. Abstr. pp 137-140.*

*EN 1991-1-2. Eurocode 1 part 1-2. Actions on structures: general actions—actions on structures exposed to fire.*

# Anexos

## Anexo 1. Enquadramento geográfico

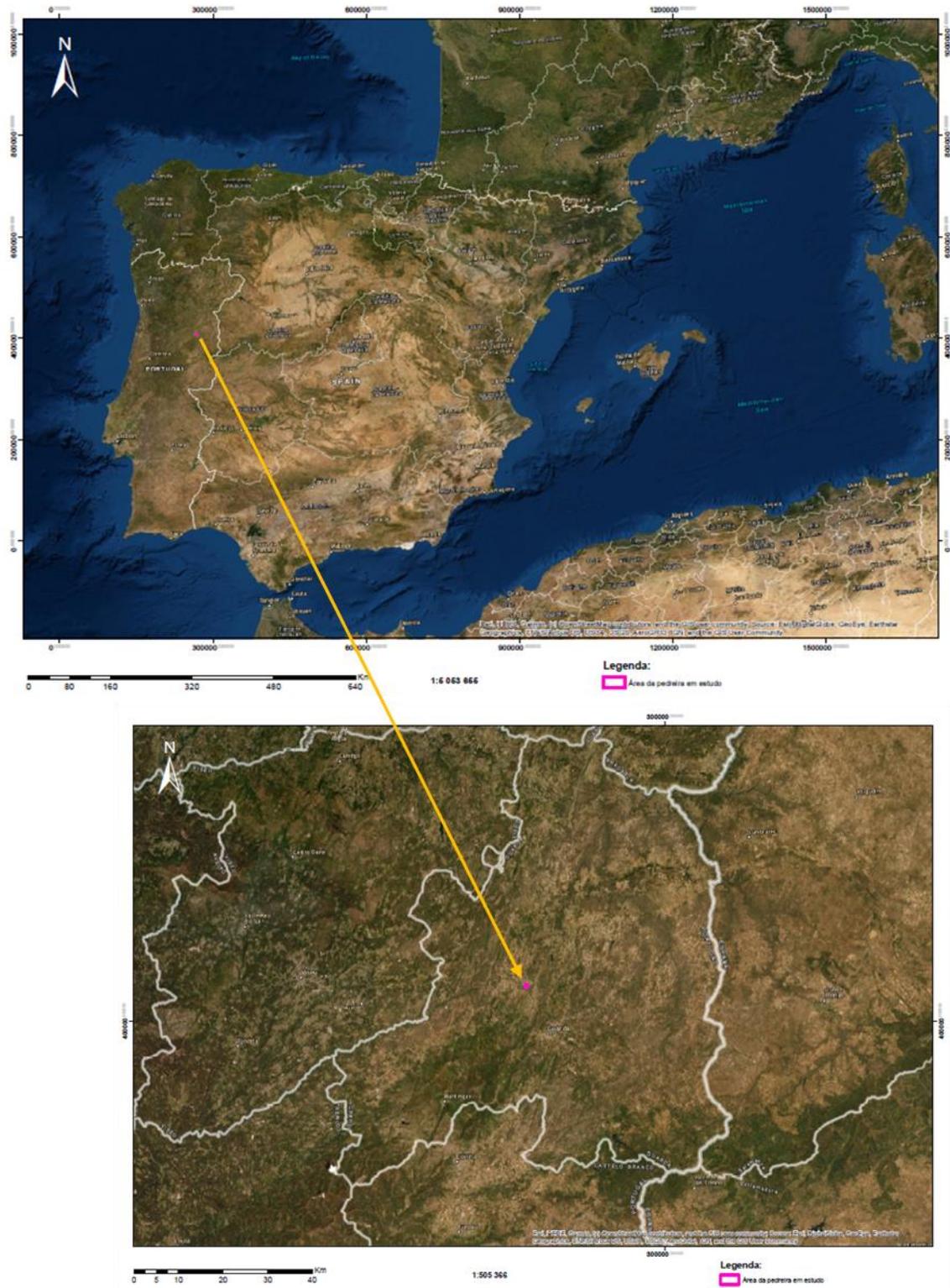


Figura A1.1: Enquadramento geográfico: Localização da pedreira da Mota-Engil.

## Anexo 2-Mineralogia

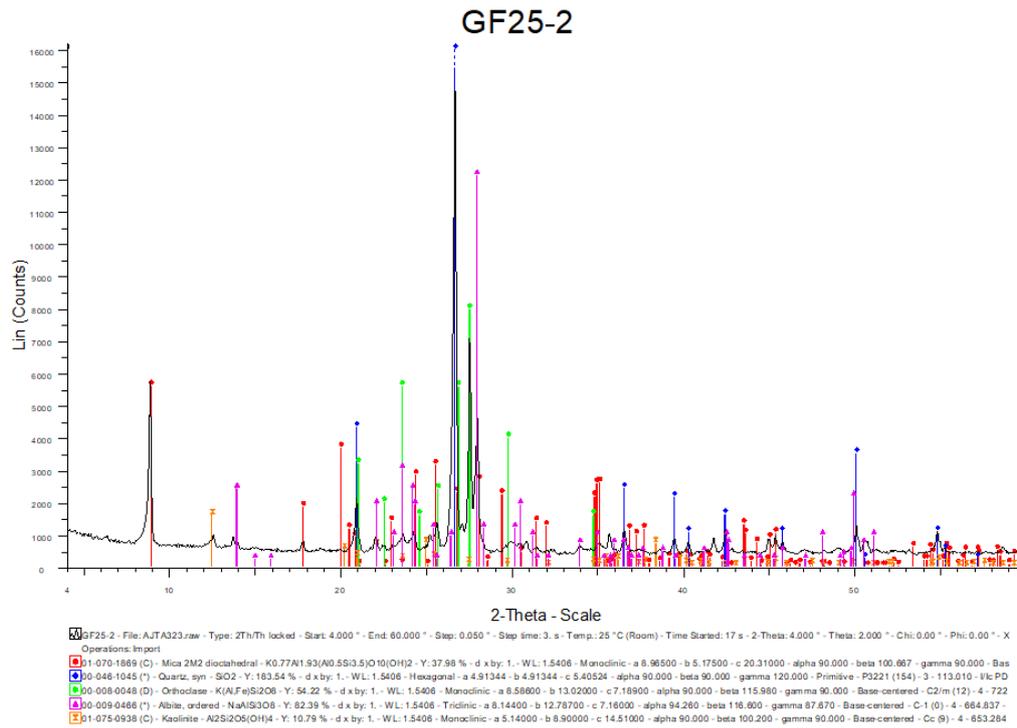


Figura A2.1: Difractograma da amostra GF25-2.

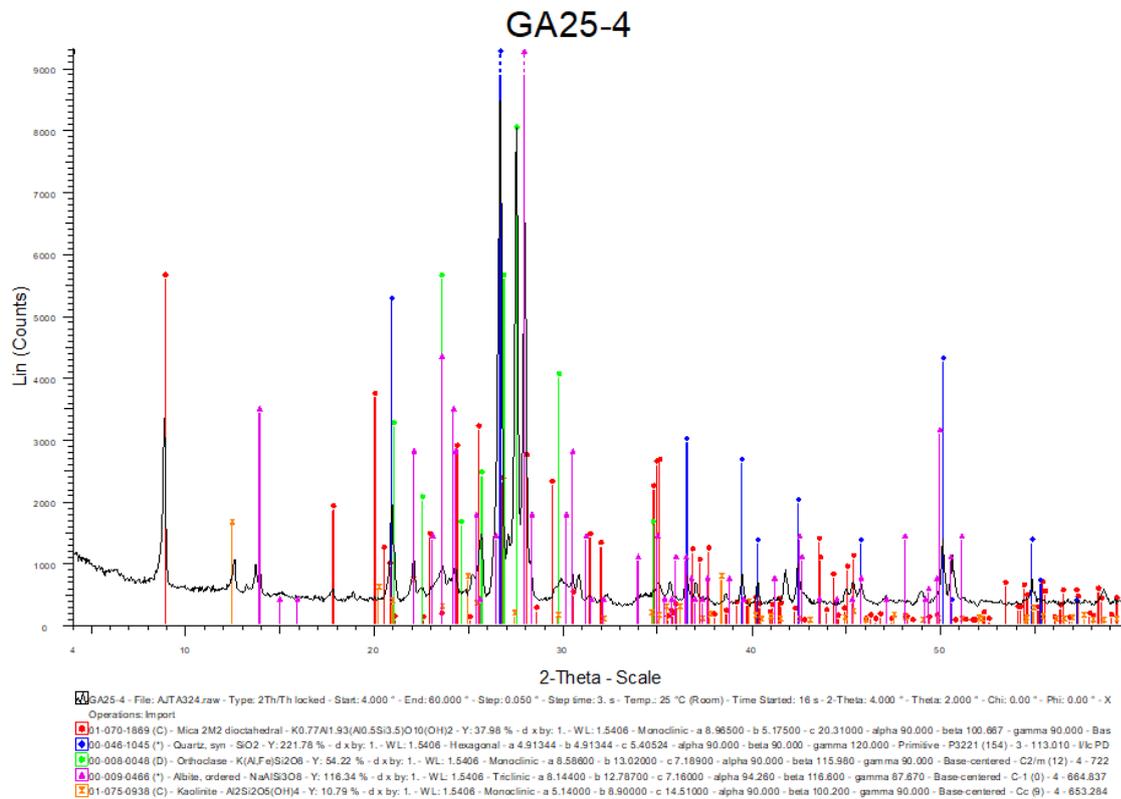


Figura A2.2: Difractograma da amostra GA25-4.

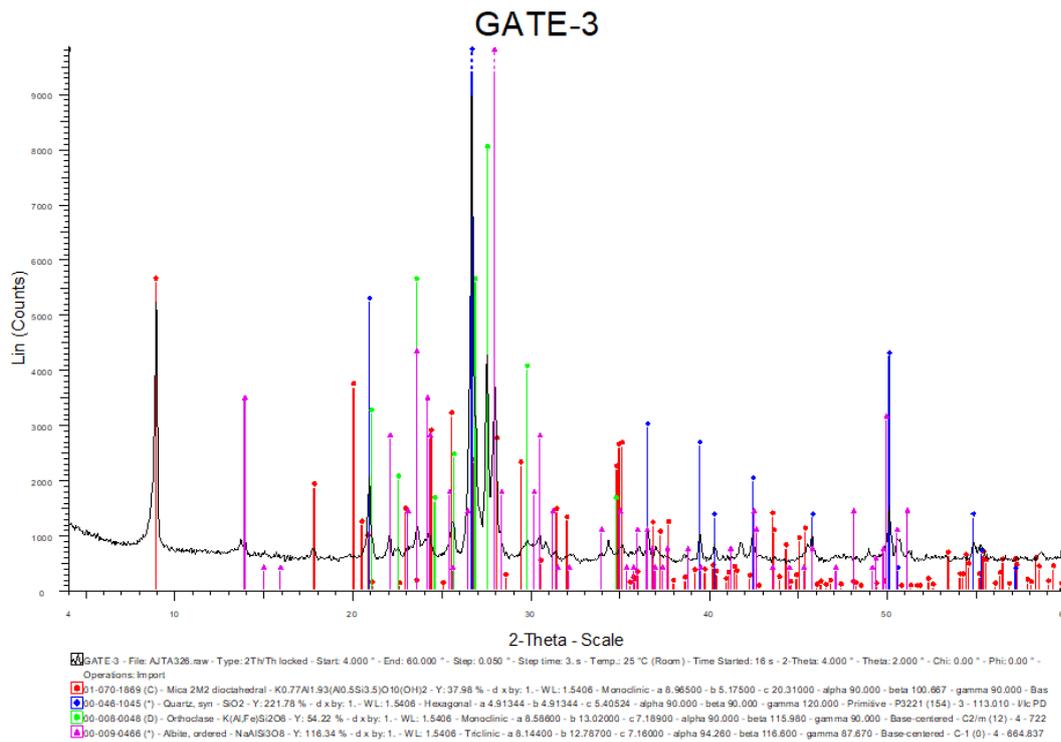


Figura A2.3: Difractograma da amostra GATE-3.

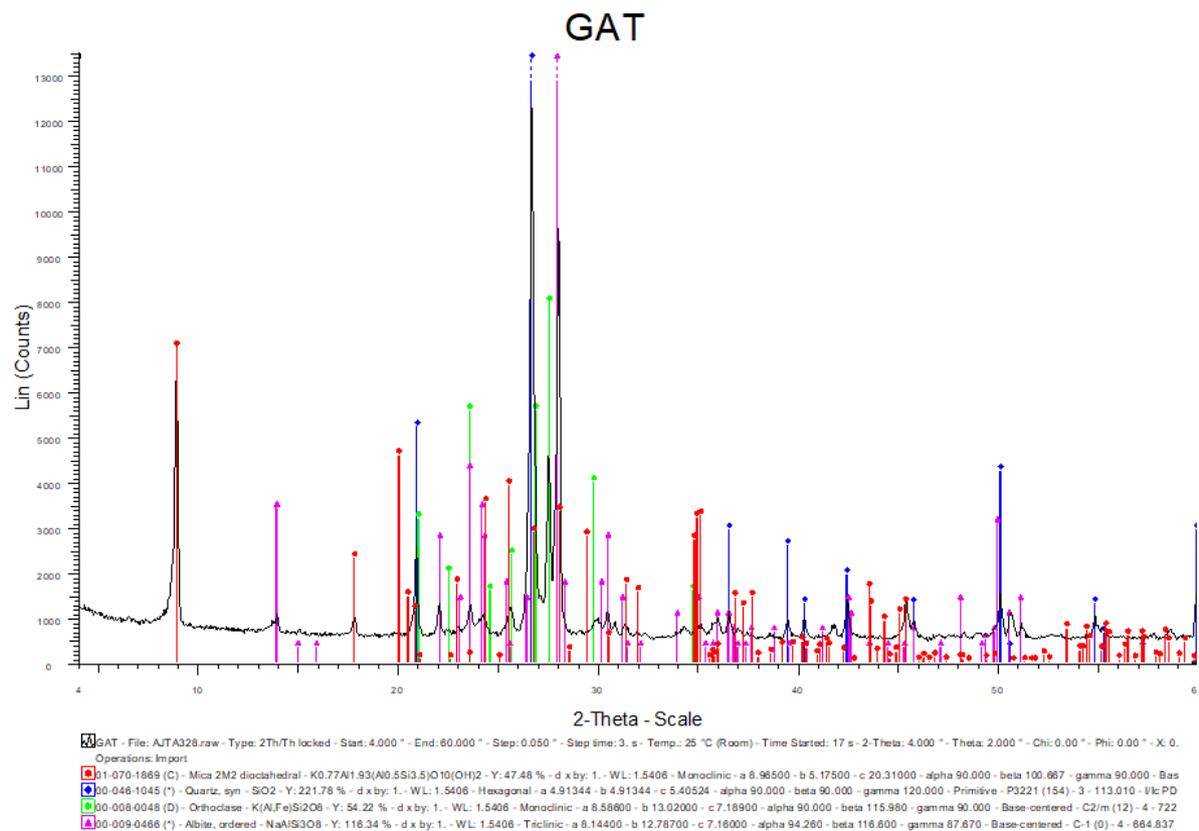


Figura A2.4: Difractograma da amostra GAT.

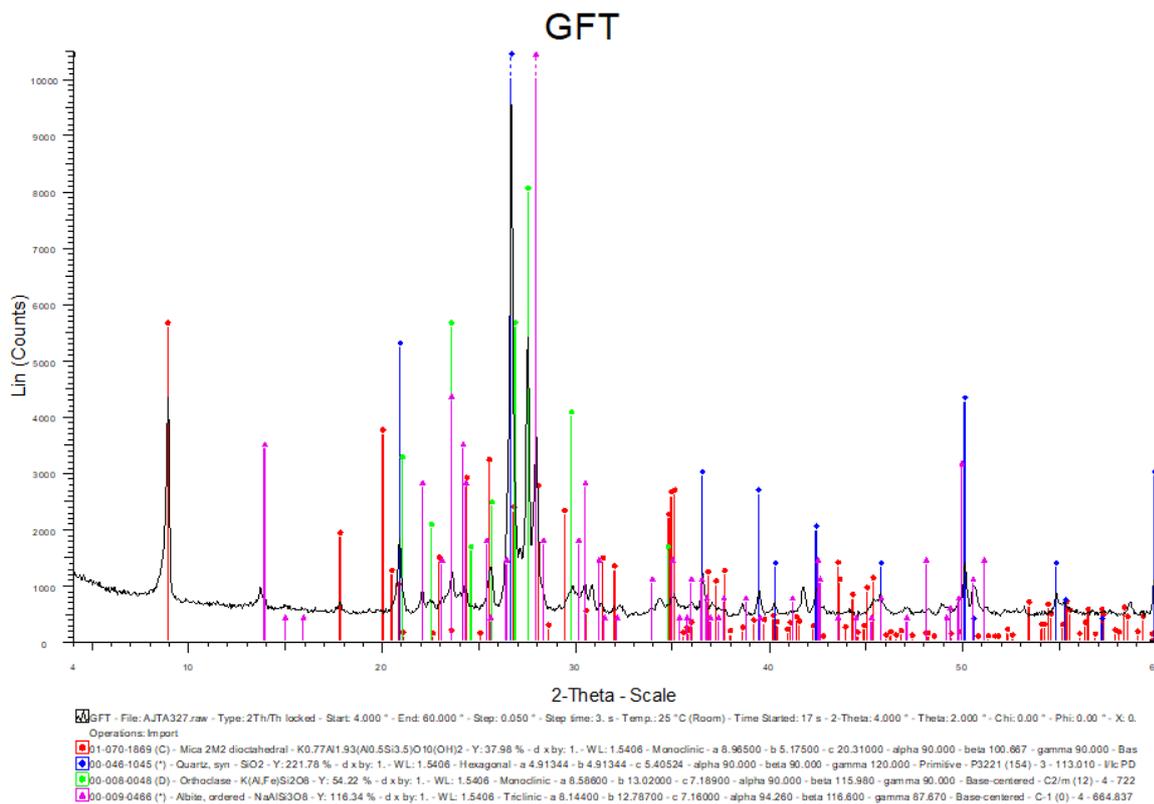


Figura A2.5: Difractograma da amostra GFT.

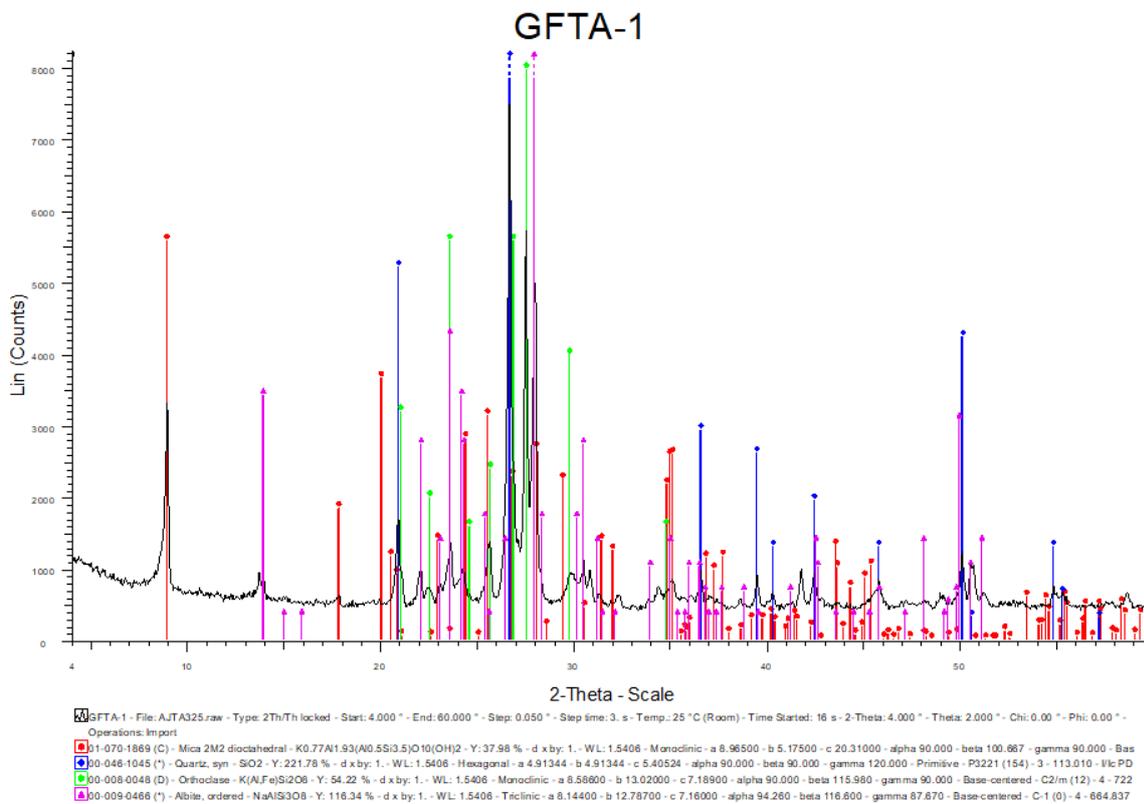


Figura A2.6: Difractograma da amostra GFTA-1.

### Anexo 3- Porosidade e Massa volúmica

Tabela A3.1: Medições e pesagens das amostras GA25.

Amostra	Altura (mm)			Média (mm)	Espessura (mm)			Média (mm)	Largura (mm)			Média (mm)	Peso (g)	1º Pesagem (g)	2º Pesagem (g)	3º Pesagem (g)
GA25-1	151.11	151.38	151.08	151.19	56.42	55.72	55.34	55.83	55.51	55.45	55.42	55.46	1211.98	1210.92	1210.48	1209.34
GA25-2	151.57	151.58	151.5	151.55	55.04	55.19	54.74	54.99	54.15	54.53	54.6	54.43	1185.26	1184.44	1184.08	1183.12
GA25-3	149.12	148.92	148.8	148.95	54.98	55.16	54.61	54.92	55.01	55.59	54.48	55.03	1172.89	1171.94	1171.49	1170.69

Tabela A3.2: Medições e pesagens das amostras GATE.

Amostra	Altura (mm)			Média (mm)	Espessura (mm)			Média (mm)	Largura (mm)			Média (mm)	Peso (g)	1º Pesagem (g)	2º Pesagem (g)	3º Pesagem (g)
GATE-1	151.82	151.69	151.4	151.64	55.2	55.55	54.6	55.12	56.4	56.06	55.55	56.00	1221.2	1220.1	1219.65	1218.49
GATE-2	151.19	151.48	151.12	151.26	55.31	55.7	55.54	55.52	55.02	55.7	55.88	55.53	1230.01	1229.06	1228.68	1227.31
GATE-3	151.7	151.75	152.06	151.84	55.19	55.72	55.42	55.44	55.85	56.31	56.17	56.11	1243.54	1242.6	1242.14	1240.2
GATE-4	152.22	152.61	152.6	152.48	53.94	53.85	52.75	53.51	54.31	53.65	53.12	53.69	1157.75	1156.62	1156.17	1155.26
GATE-5	151.31	151.32	151.04	151.22	53.84	54.1	53.63	53.86	53.07	54.02	53.71	53.60	1133.14	1132	1131.54	1130.65
GATE-6	150.97	151.25	150.97	151.06	55.71	56.34	55.96	56.00	55.74	56.36	56.1	56.07	1235.23	1234.35	1233.97	1232.92
GATE-7	150.68	150.65	150.43	150.59	53.66	53.97	53.42	53.68	54.04	53.8	53.53	53.79	1150.04	1148.85	1148.33	1147.29
GATE-8	151.65	151.75	151.56	151.65	54	53.54	52.68	53.41	54.15	54.04	53.8	54.00	1140.37	1139.17	1138.66	1137.6
GATE-9	152.36	152.15	152.07	152.19	55.25	55.85	55.21	55.44	56.83	56.03	56.02	56.29	1242.62	1241.5	1240.98	1239.51
GATE-10	152.92	152.75	152.48	152.72	53.63	53.93	53	53.52	54.06	53.45	52.78	53.43	1153.92	1152.81	1152.32	1151.31
GATE-11	151.77	153.41	152.2	152.46	53.75	53.26	52.42	53.14	53.25	53.87	53.98	53.70	1130.1	1128.85	1128.34	1127.35
GATE-12	151.76	152.03	151.77	151.85	55.84	55.87	55.24	55.65	55.98	56.54	56.81	56.44	1258.35	1257.25	1256.8	1255.68
GATE-13	151.98	152.06	151.7	151.91	55.62	55.53	55.21	55.45	56.33	56.36	55.79	56.16	1245.78	1244.82	1244.39	1243.25
GATE-14	151.9	152	151.8	151.90	55.51	55.56	55.44	55.50	56.26	56.31	55.91	56.16	1244.75	1244.25	1244.1	1243.82

Tabela A3.3: Medições e pesagens das amostras GF25.

Amostra	Altura (mm)			Média (mm)	Espessura (mm)			Média (mm)	Largura (mm)			Média (mm)	Peso (g)	1° Pesagem (g)	2° Pesagem (g)	3° Pesagem (g)
GF25-1	152.1	151.89	151.84	151.94	55.96	55.79	56.46	56.07	55.92	56.31	55.8	56.01	1244	1249.18	1248.9	1247.65
GF25-2	151.46	152.06	152.1	151.87	56.57	56.39	55.87	56.28	56.4	55.9	56.1	56.13	1243.81	1243.26	1242.97	1241.7
GF25-3	151.32	150.02	150.09	150.48	55.89	55.35	56.09	55.78	56.09	55.95	55.85	55.96	1224.64	1224.19	1223.92	1222.69

Tabela A3.4: Medições e pesagens das amostras GFTE.

Amostra	Altura (mm)			Média (mm)	Espessura (mm)			Média (mm)	Largura (mm)			Média (mm)	Peso (g)	1° Pesagem (g)	2° Pesagem (g)	3° Pesagem (g)
GFTE1	151.45	151.5	151.03	151.33	56.16	56.16	55.45	55.92	55.87	56.56	56.01	56.15	1237.75	1237.21	1236.93	1235.56
GFTE2	150.9	150.85	151.01	150.92	56.16	56.75	56.06	56.32	56.01	56.64	56.01	56.22	1251.47	1251	1250.74	1249.53
GFTE3	150.94	151.08	150.86	150.96	56.19	56.71	55.81	56.24	56.26	56.5	56.03	56.26	1260.42	1259.87	1259.58	1258.28
GFTE4	150.25	150.3	150.2	150.25	55.67	56.4	56.11	56.06	55.27	55.98	55.88	55.71	1241.46	1240.92	1240.64	1239.31
GFTE5	151.65	151.58	151.74	151.66	55.38	54.77	54.41	54.85	55.25	54.93	54.34	54.84	1210.1	1209.59	1209.34	1208.06
GFTE6	151.63	152	151.55	151.73	54.32	54.71	55.06	54.70	54.47	54.83	54.86	54.72	1194.32	1193.9	1193.64	1192.45
GFTE7	151.61	151.65	151.78	151.68	55.34	55.21	55.23	55.26	55.04	55.68	56.16	55.63	1230.68	1230.21	1229.96	1228.66
GFTE8	151.71	151.82	151.85	151.79	53.87	54.95	54.56	54.46	54.57	55.13	54.62	54.77	1195.14	1194.66	1194.4	1193.18
GFTE9	151.8	152.02	151.85	151.89	55.03	55.2	54.68	54.97	55.19	54.92	53.8	54.64	1204.13	1203.61	1203.34	1202.14
GFTE10	151.65	151.8	151.99	151.81	54.23	54.93	55.69	54.95	55.13	55.58	55.9	55.54	1219.5	1218.99	1218.7	1217.38
GFTE11	153.4	151.74	152.51	152.55	54.98	55.03	54.94	54.98	54.52	54.74	56.25	55.17	1198.8	1198.31	1198.07	1196.81
GFTE-12	150.02	150.02	150.02	150.02	55.87	55.94	55.45	55.75	56.06	56.41	55.6	56.02	1217.68	1217.17	1216.9	1215.63
GFTE-13	151.34	151.15	151.03	151.17	55.49	55.85	55.86	55.73	55.25	55.13	55.03	55.14	1222.39	1221.89	1221.61	1220.4

## Anexo 4- Absorção de água por parte da rocha

Tabela A4.1: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 25°C.

<b>Temperatura (25°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>
<b>1</b>	0.40	2.20
<b>2</b>	0.54	1.32
<b>3</b>	0.49	0.90
<b>4</b>	0.49	4.5
<b>5</b>	0.25	2.50
<b>6</b>	0.46	0.58
<b>7</b>	0.46	1.04
<b>8</b>	0.18	1.06
<b>9</b>	0.40	1.05
<b>10</b>	0.38	1.15
<b>11</b>	0.44	1.68
<b>Média</b>	0.41	1.63
<b>Mediana</b>	0.44	1.15
<b>Desvio Padrão</b>	0.10	1.06

Tabela A4.2: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 400°C.

<b>Temperatura (400°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>
<b>1</b>	4.31	7.34
<b>2</b>	4.23	7.51
<b>3</b>	4.39	8.78

Tabela A4.3: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 500°C.

<b>Temperatura (500°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>
<b>1</b>	5.73	9.59
<b>2</b>	7.84	9.44
<b>3</b>	8.06	8.74

Tabela A4.4: Absorção de água por parte de GFTE e GATE à temperatura de 600°C.

<b>Temperatura (600°C)</b>	<b>GFTE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>	<b>GATE (g/m<sup>2</sup> por segundo)</b>
<b>1</b>	53.85	72.95
<b>2</b>	54.46	57.89
<b>3</b>	47.35	82.63

## Anexo 5-Fracturas

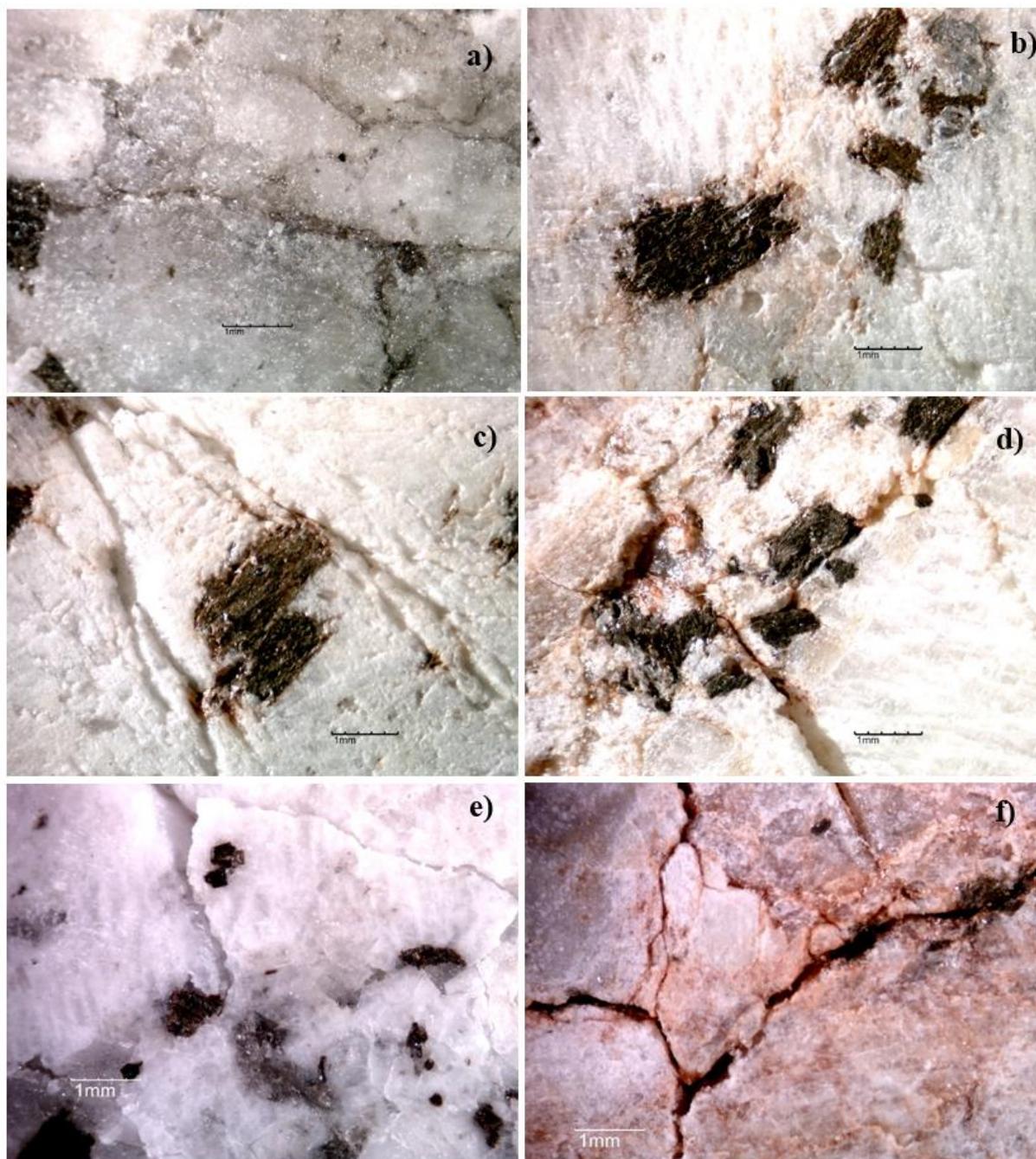


Figura A5.1: a) Fracturas intragranulares na amostra GFTE a 400°C; b) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 400°C; c) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 500°C; d) Fracturas intragranulares na amostra GATE a 500°C; e) Fracturas intergranulares na amostra GFTE a 600°C; f) Fracturas intergranulares na amostra GATE a 600°C.

## Anexo 6-Velocidade das ondas P e S

Tabela A6.1: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE à temperatura ambiente.

Amostras	GFTE		Amostras	GATE	
	Ondas P (m/s)	Ondas S (m/s)		Ondas P (m/s)	Ondas S (m/s)
<b>GFTE-1</b>	4236.47	2323.81	<b>GATE-1</b>	3418.32	1956.10
<b>GFTE-2</b>	4146.15	2248.51	<b>GATE-2</b>	3861.71	2138.90
<b>GFTE-3</b>	4251.20	2262.59	<b>GATE-3</b>	3937.67	2123.59
<b>GFTE-4</b>	4292.86	2293.19	<b>GATE-4</b>	3219.52	1779.19
<b>GFTE-5</b>	4367.99	2286.74	<b>GATE-5</b>	3179.63	1855.50
<b>GFTE-6</b>	4320.24	2301.68	<b>GATE-6</b>	3914.57	2112.18
<b>GFTE-7</b>	4294.45	2246.45	<b>GATE-7</b>	3355.32	1652.98
<b>GFTE-8</b>	4273.46	2313.22	<b>GATE-8</b>	3232.17	1782.48
<b>GFTE-9</b>	4324.89	2065.97	<b>GATE-9</b>	3579.34	2026.00
<b>GFTE-10</b>	4475.63	2375.05	<b>GATE-10</b>	3368.25	1930.19
<b>GFTE-11</b>	4368.56	2808.36	<b>GATE-11</b>	3142.21	1799.58
-	-	-	<b>GATE-12</b>	3589.51	2024.50
-	-	-	<b>GATE-13</b>	3749.10	2022.81
-	-	-	<b>GATE-14</b>	3682.88	2008.85

Tabela A6.2: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 400°C.

Granitos a 400°C				
	Ondas P (m/s)		Ondas S (m/s)	
	25°C	400°C	25°C	400°C
<b>GFTE-3</b>	4251.20	2648.42	2262.59	1395.19
<b>GFTE-7</b>	4294.45	2708.57	2246.45	1300.86
<b>GFTE-11</b>	4368.56	2783.76	2808.36	1492.66
<b>GATE-1</b>	3418.32	2174.33	1956.10	1134.58
<b>GATE-7</b>	3355.32	2370.00	1652.98	788.36
<b>GATE-10</b>	3368.25	2343.64	1930.19	1204.67

Tabela A6.3: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 500°C.

<b>Granitos a 500°C</b>				
	<b>Ondas P (m/s)</b>		<b>Ondas S (m/s)</b>	
	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>	<b>25°C</b>	<b>500°C</b>
<b>GFTE-2</b>	4146.15	1934.87	2248.51	1074.93
<b>GFTE-9</b>	4324.89	1998.55	2065.97	1147.21
<b>GFTE-10</b>	4475.63	1997.54	2375.05	1113.00
<b>GATE-5</b>	3179.63	1606.01	1855.50	868.21
<b>GATE-9</b>	3579.34	2088.04	2026.00	958.10
<b>GATE-11</b>	3142.21	1649.15	1799.58	924.47
<b>GATE-14</b>	3682.88	1898.09	2008.85	899.55

Tabela A6.4: Velocidade das ondas P e S de GFTE e GATE a 600°C.

<b>Granitos a 600°C</b>				
	<b>Ondas P (m/s)</b>		<b>Ondas S (m/s)</b>	
	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>	<b>25°C</b>	<b>600°C</b>
<b>GFTE-4</b>	4292.86	736.52	2293.19	480.95
<b>GFTE-5</b>	4367.99	796.52	2286.74	573.59
<b>GFTE-12</b>	4189.22	746.04	2281.60	430.84
<b>GFTE-13</b>	4189.33	712.87	2275.79	443.60
<b>GATE-2</b>	3861.71	605.12	2138.90	444.48
<b>GATE-12</b>	3589.51	692.05	2024.50	504.77
<b>GATE-13</b>	3749.10	828.15	2022.81	450.51

## Anexo 7- Resistência à Tracção

Tabela A7.1: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 25°C.

<b>Resistência à Tracção</b>		
<b>25°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>1</b>	8.47	7.43
<b>2</b>	6.33	7.06
<b>3</b>	10.59	8.82
<b>4</b>	10.34	6.49
<b>5</b>	9.62	6.76
<b>Média</b>	9.07	7.31
<b>Mediana</b>	9.62	7.06

Tabela A7.2: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 400°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>400°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>400°C</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>9</b>	4.72	<b>4</b>	5.40
<b>11</b>	4.84	<b>5</b>	5.85
<b>12</b>	4.42	<b>8</b>	5.86

Tabela A7.3: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 500°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>500°C</b>	<b>GFTE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>500°C</b>	<b>GATE-B <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>3</b>	4.61	<b>1</b>	4.43
<b>6</b>	4.63	<b>3</b>	3.61
<b>7</b>	4.96	<b>10</b>	4.48

Tabela A7.4: Ponto de Rotura para o GFTE-B e GATE-B no ensaio de resistência à tracção a 600°C.

<b>Resistência à Tracção</b>			
<b>600°C</b>	<b>Granito Fresco “GFTE-B” <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	<b>600°C</b>	<b>Granito Alterado “GATE-B” <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>
<b>1</b>	1.55	<b>6</b>	1.79
<b>2</b>	2.48	<b>9</b>	3.27
<b>8</b>	1.56	<b>11</b>	1.76

## Anexo 8- Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade

Tabela A8.1: Tensão de rotura de GFTE e GATE a 25°C.

<b>Temperatura de 25°C</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	97.51	64.67
	112.87	81.60
	102.36	75.55

Tabela A8.2: Tensão de rotura de GFTE e GATE a 400°C.

<b>Temperatura de 400°C</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	80.15	97.53
	75.16	90.93
	68.21	75.11

Tabela A8.3: Tensão de rotura de GFTE e GATE a 500°C.

<b>Temperatura de 500°C</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	61.26	81.20
	57.92	67.15
	54.76	92.19

Tabela A8.4: Tensão de rotura de GFTE e GATE a 600°C.

<b>Temperatura de 600°C</b>	<b>GFTE</b>	<b>GATE</b>
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	36.11	44.31
	38.39	57.28
	33.08	37.53

Tabela A8.5: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 25°C.

<b>25°C</b>									
<b>GFTE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>	<b>GATE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>
25-1	49.46	0.22	34.64	0.29	25-2	36.36	0.16	30.27	0.30
25-2	50.13	0.21	35.23	0.28	25-3	30.78	0.15	26.05	0.29
25-3	46.90	0.13	45.67	0.09	25-4	36.36	0.15	25.74	0.24

Tabela A8.6: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 400°C.

<b>400°C</b>									
<b>GFTE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>	<b>GATE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>
3	16.61	0.05	13.44	0.31	1	18.36	0.07	8.92	0.31
7	17.55	0.08	12.06	0.35	7	19.18	0.08	4.72	0.44
11	20.96	0.04	15.27	0.30	10	37.30	0.05	10.12	0.32

Tabela A8.7: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 500°C.

<b>500°C</b>									
<b>GFTE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>	<b>GATE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>
2	12.60	0.09	7.76	0.28	5	11.78	0.01	5.13	0.29
9	12.77	0.03	8.68	0.25	9	14.27	0.04	6.60	0.37
10	10.32	0.01	8.31	0.27	14	15.33	0.03	5.71	0.27

Tabela A8.8: Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (estático e dinâmico) a 600°C.

<b>600°C</b>									
<b>GFTE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>	<b>GATE</b>	<b>E<sub>s</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>s</sub></b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>v<sub>d</sub></b>
4	6.49	0.07	1.33	0.13	2	5.64	0.01	0.92	0
5	4.55	0.01	1.61	0	12	5.60	0.11	1.21	0
12	3.78	0.01	1.18	0.25	13	4.38	0.11	1.34	0.29

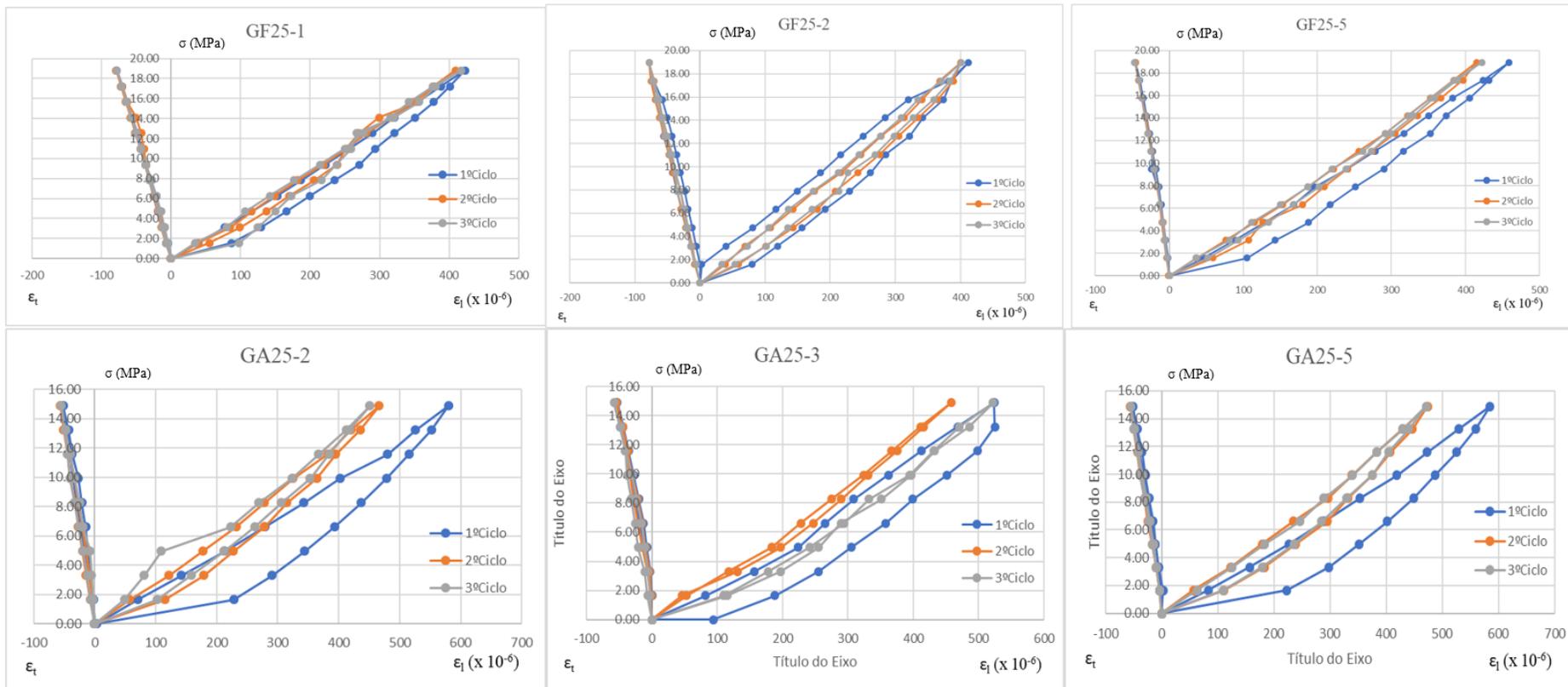


Figura A8.1: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 25°C.

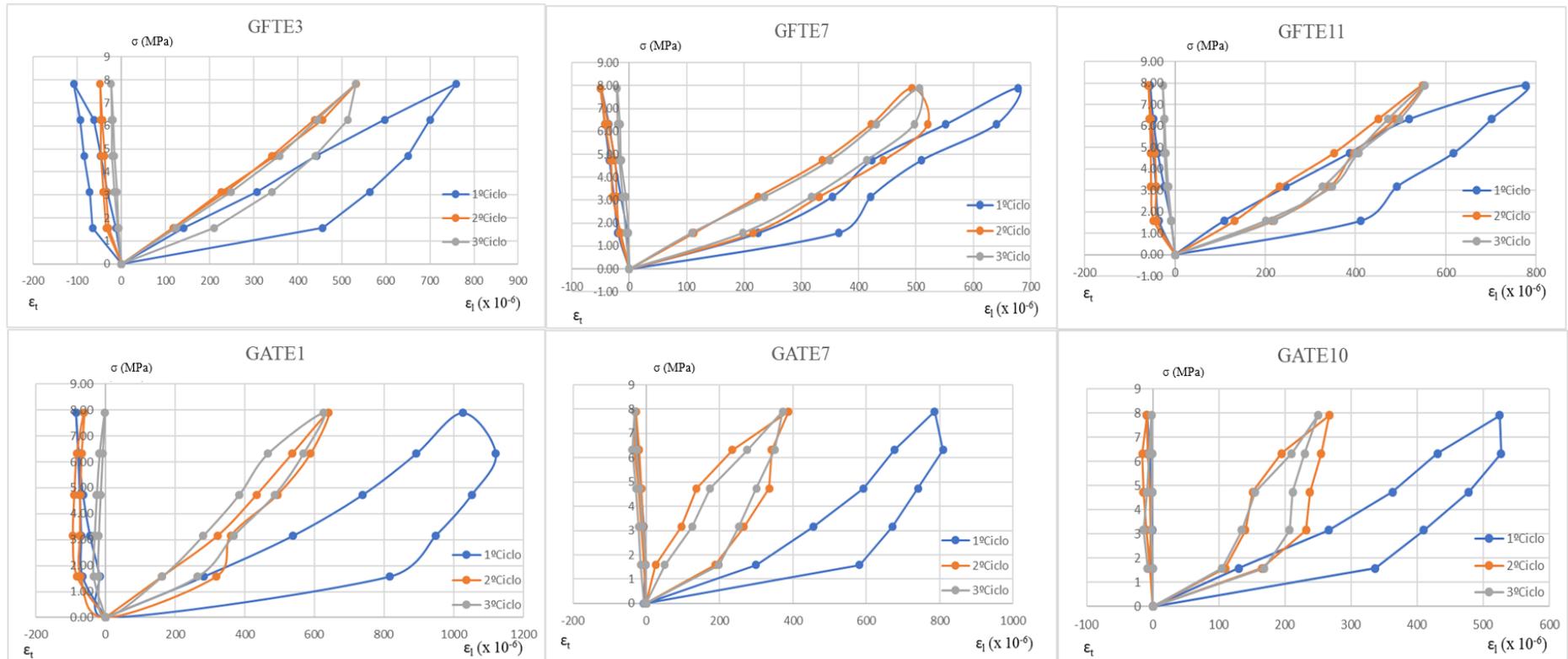


Figura A8.2: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 400°C.

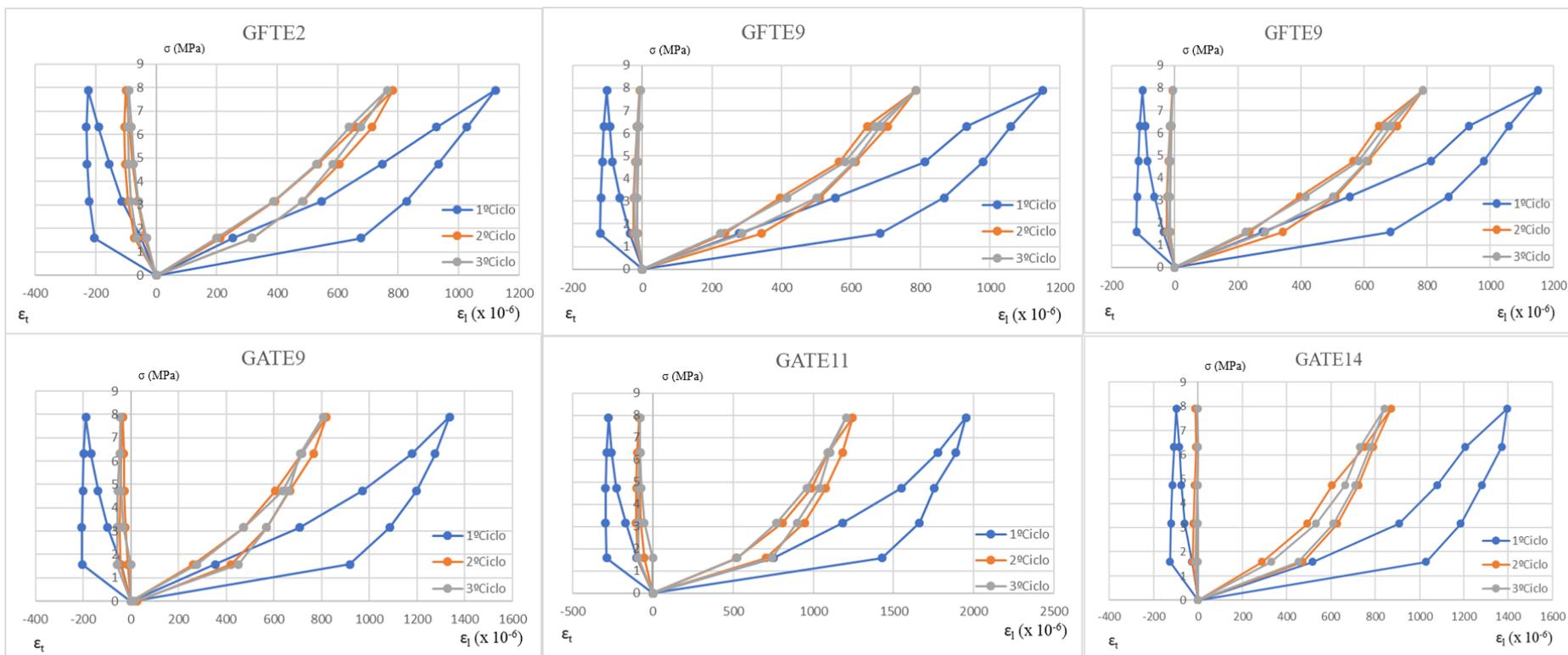


Figura A8.3: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 500°C.

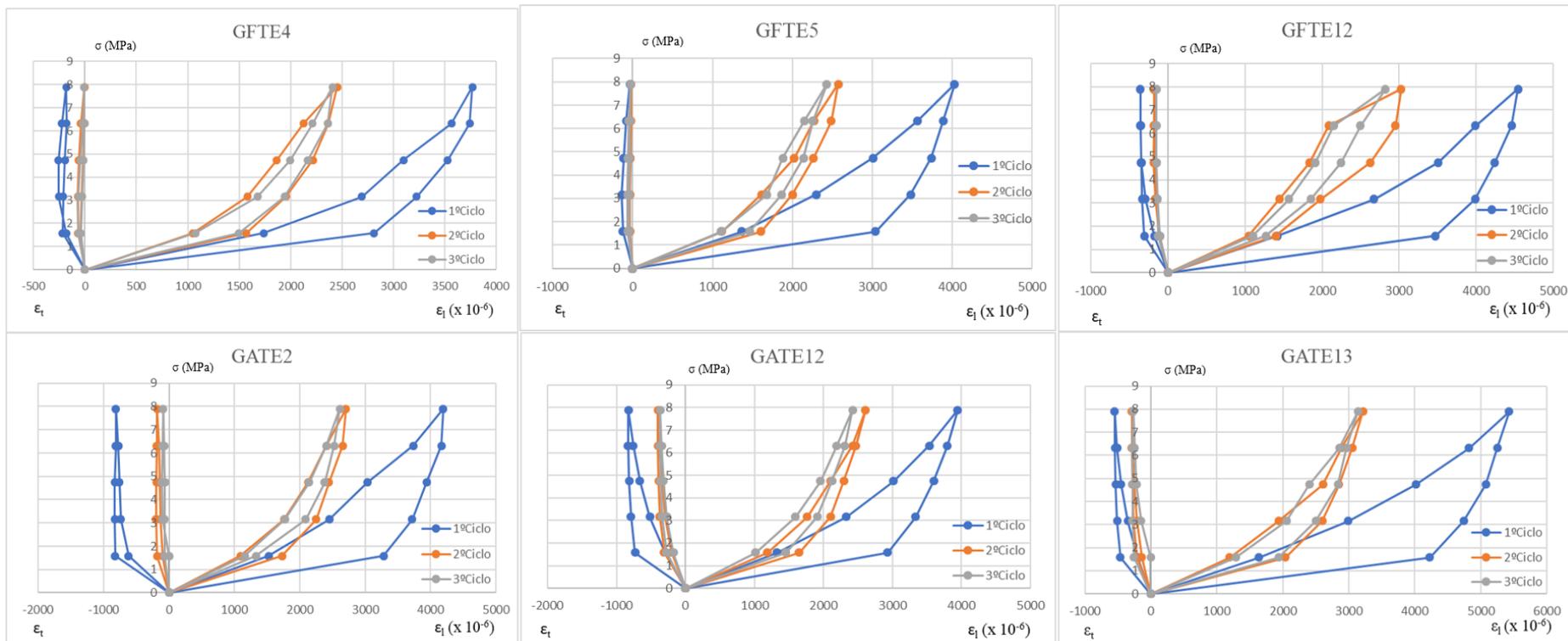


Figura A8.4: Ciclos de carga e descarga dos provetes GFTE e GATE a 600°C.

## Anexo 9- Cor

Tabela A9.1: Valores médios dos parâmetros para cada amostra analisada do GFTE e GATE a 25°C.

Parâmetros de cor (média)								
Temperatura	Amostras	L*	a*	b*	Amostras	L*	a*	b*
25°C	GFTE-1	67.57	-0.77	1.17	GATE-1	68.12	-0.38	6.91
	GFTE-2	65.51	-0.73	0.62	GATE-2	66.73	-0.37	6.22
	GFTE-3	71.19	-1.00	1.16	GATE-3	60.98	0.01	8.05
	GFTE-4	71.57	-1.08	1.42	GATE-4	65.04	-0.46	5.87
	GFTE-5	68.69	-0.99	1.20	GATE-5	70.03	-0.33	6.83
	GFTE-6	66.12	-0.95	1.28	GATE-6	65.58	-1.23	4.70
	GFTE-7	66.65	-1.04	1.23	GATE-7	68.55	-0.57	5.70
	GFTE-8	69.80	-0.99	1.27	GATE-8	70.73	-0.79	5.83
	GFTE-9	67.51	-1.01	1.11	GATE-9	67.35	0.76	10.45
	GFTE-10	65.12	-1.10	0.67	GATE-10	68.16	-0.45	6.69
	GFTE-11	68.55	-0.86	1.23	GATE-11	71.53	-0.02	6.40

Tabela A9.2: Valores médios dos parâmetros para cada amostra analisada do GFTE e GATE nas diversas temperaturas.

Parâmetros de cor (média)								
Temperatura	Aquecidos				Padrão (25°C)			
	Amostras	L*	a*	b*	Amostras	L*	a*	b*
400°C	GFTE-3	63.86	0.10	4.05	GFTE-3	71.19	-1.00	1.16
	GFTE-7	64.91	0.09	3.97	GFTE-7	66.65	-1.04	1.23
	GFTE-11	63.84	0.19	4.38	GFTE-11	68.55	-0.86	1.23
500°C	GFTE-2	64.66	0.28	4.91	GFTE-2	65.51	-0.73	0.62
	GFTE-9	65.76	0.46	5.54	GFTE-9	67.51	-1.01	1.11
	GFTE-10	64.30	0.53	4.28	GFTE-10	65.12	-1.10	0.67
	GFTE-4	66.67	0.87	6.07	GFTE-4	71.57	-1.08	1.42
600°C	GFTE-5	68.66	0.49	4.69	GFTE-5	68.69	-0.99	1.20
	GFTE-12	68.49	0.78	5.84	GFTE-12			
	GFTE-13	68.74	0.57	4.87	GFTE-13			