

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO POLIMENTO DE DIFERENTES  
“GRANITOS” E AS RELAÇÕES COM A MINERALOGIA

MÁRCIA DE CARVALHO NEVES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Ciências, Programa de Pós  
Graduação em Geotecnia.

PROFESSOR DR. ANTENOR BRAGA PARAGUASSÚ

SÃO CARLOS - SP

2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Nonato e Lusimar,  
com amor e gratidão, pelo carinho  
e apoio ao longo desse trabalho.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa de estudos concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Dr. Antenor Braga Paraguassú pela orientação, paciência e pela incansável dedicação ao longo de todas as etapas de elaboração da dissertação.

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, pela infraestrutura oferecida para o programa de pós-graduação e pela oportunidade de aprimoramento profissional.

Ao professor Dr. José Eduardo Rodrigues pela co-orientação e atenção dedicada durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores Doutores Antonio Carlos Artur e ao Dr. Ely Borges Frazão pelas sugestões, críticas e avaliações.

Ao colega Leonardo Silveira por todo auxílio, prontidão e discussões enriquecedoras durante o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Geotecnia pela atenção e apoio durante todo o trabalho.

Ao “grupo” de Rochas Ornamentais, Damares, Karin e Lizandra, pelas trocas de informações, sugestões, favores e pela amizade verdadeira nestes anos de convívio.

Às amigas que conquistei e que levarei por toda vida, minhas eternas “irmãs” Carla, Ju Maria, Luciene, Rafaela, Wanessa, Prof<sup>a</sup>. Marcilene, Aline “Zuquetinha”, por me ensinar o verdadeiro valor da amizade e por proporcionar muitas alegrias em nossas reuniões nas famosas “assembléias geotécnicas”.

Aos amigos queridos, turma 2008, Nene, Aleones, Giovana, Natália, Marla, Felipe e Victor, pelos momentos de descontração e de muito tormento no período das disciplinas oferecidas.

Aos meus pais, Nonato e Lusimar, por acompanharem de longe a minha caminhada, sempre buscando me dar força e proteção. Aos meus irmãos Murilo e Milena, por torcerem pelo meu sucesso.

Às minhas tias Andréa, Gracinha e Linda, que sempre estiveram do meu lado, dando todo apoio nesta caminhada, assim como, meus tios Artur, Bosco, Cadinho, Guilherme, Tine e Robson.

Às minhas primas “irmãs” Maíra e Tainá, que agora presentes, puderam acompanhar minha luta e sempre acreditando na minha vitória.

Ao meu namorado Ricardo, pelo amor e apoio incondicional durante esses dois anos de mestrado e também por suas palavras de conforto nos momentos mais difíceis.

A todas as pessoas que de alguma forma colaboraram para que este trabalho chegasse ao fim.

À Deus, principalmente, por me guiar e iluminar sempre o meu caminho.



“Quando a gente acha que tem todas as respostas, vem a vida e muda todas as perguntas”.

Luís Fernando Veríssimo

## RESUMO

NEVES, M. C. (2010). **Estudo experimental do polimento de diferentes “granitos” e as relações com a mineralogia**. São Carlos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 113p.

O aspecto estético das rochas de revestimento é o primeiro condicionante para o seu uso nas edificações, seguido das suas características tecnológicas, da tipologia do jazimento e dos possíveis defeitos decorrentes das etapas de extração e beneficiamento. O presente trabalho aborda os mecanismos que influenciam no processo de polimento, lembrando que a indústria ainda se baseia no empirismo, com generalizações não condizentes que aumentam o custo de produção das placas. Foram escolhidos três tipos de rochas “graníticas”: Sienogranito (Vermelho Brasília), Migmatito (Jacarandá Rosado) e Monzogranito (Cinza Andorinha), por serem de alta comercialização e consideradas no processamento industrial como “dura”, “média” e “mole”, respectivamente. Foram ensaiadas no Simulador de Polimento de Rochas (SPR), utilizando o abrasivo magnésiano e antes de iniciar o processo foi determinada a rugosidade superficial de cada amostra. Variando-se a carga aplicada na politriz, a velocidade, o tempo e monitorando a perda de massa associada ao brilho, foi possível estabelecer as condições ideais para os tipos de rochas estudadas.

*Palavras-chave:* Rochas Ornamentais; Granitos; Polimento; Brilho.

## ABSTRACT

NEVES, M. C. (2010). **Experimental study of different “granites” polishing and its relation with mineralogy**. Sao Carlos. Master of Dissertation. Escola de Engenharia de Sao Carlos. Universidade de Sao Paulo. 113p.

Dimension Stones aesthetics are the main factor considered in their use for buildings, followed by technological characteristics, deposit's typology and possible extraction and beneficiacion effects. This paper approaches the influential mechanisms on polishing process, considering that industry still bases itself on empiricisms, with incoherent generalizations that increase production slabs cost. Three types of granite rocks were evaluated: Sienogranite (Vermelho Brasília), Migmatite (Jacarandá Rosado) and Monzogranite (Cinza Andorinha), due to their highly commercialization. The rocks are classified at the industrial process as hard, medium and soft (respectively). They were tested with a polishing rock simulator through the use of magnesium abrasives and had the surface roughness pre-determined for each sample. By altering the polishing machine applied load, as well as speed and time, and having the brightness associated weight loss monitored, it was possible to stabilize ideal conditions for the studied rock types.

*Key Words:* Dimension Stones, Granites; Polishing, Brightness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - variação comparada da taxa de crescimento do valor das exportações brasileiras de rochas ornamentais no período de 2007/2010 (ABIROCHAS, 2010). .....	29
Figura 2.2 - Exportações mensais do setor de rochas ornamentais no período 2007/2010 (ABIROCHAS, 2010). .....	30
Figura 2.3 – Aspectos macroscópico (A) e microscópico (B) do <i>Sienogranito</i> Vermelho Brasília (RIBEIRO, 2008). .....	34
Figura 2.4 - (a) Extração em maciços rochosos e (b) Extração em matacões, Bragança Paulista - SP. ....	39
Figura 2.5 - Visita técnica na Marmoraria Braminas em Bragança Paulista-SP: (a) vista frontal dos teares e (b) detalhe do desdobramento do bloco. ....	41
Figura 2.6 - (a) Processo de flamejamento nas placas de rochas ornamentais e (b) detalhe do processo (ARTUR; GALEMBECK, 2008). .....	42
Figura 2.7 - (a) Polimento na superfície da placa de rocha e (b) adição de resina. ....	43
Figura 2.8 - Modelo de politriz manual (CETEMAG, 2003). .....	44
Figura 2.9 - Politriz de ponte móvel (CETEMAG, 2003). .....	45
Figura 2.10 - Politriz Multicabeças (Braminas, Bragança Paulista - SP). ....	45
Figura 2.11 - Efeito da tenacidade e da fragilidade da partícula sobre sua eficiência em desgastar (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993). .....	50
Figura 2.12 - Aparelho usado na medição do brilho “glossmeter” .....	52
Figura 2.13 - “ARC” Avaliador de Rugosidade de Chapas e detalhe da ponta de vídeo. ....	54
Figura 2.14 - Definição de $R_t$ - Perfil de Rugosidade (Sandvik, 1994 apud Spínola, 1998). ..	54
Figura 2.15 - Tipos de irregularidades de superfície: A) Forma “defeituosa”; B) Forma ondulada; C) Formas rugosas (BLASI et. al. 1995 apud RIBEIRO, 2005). .....	55

Figura 2.16 - Esquema de desgaste a dois e a três corpos (ZUM GAHR, 1987). .....	56
Figura 2.17 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de pin-on-disk (SILVEIRA, 2007). .....	57
Figura 2.18 - (a) SPR – Simulador de Polimento de Rochas e (b) detalhe do disco de rocha em contato com o abrasivo (SILVEIRA, 2007). .....	58
Figura 3.1 - <i>Sienogranito</i> Vermelho Brasília .....	62
Figura 3.2 - <i>Monzogranito</i> Cinza Andorinha .....	64
Figura 3.3 - <i>Migmatito Sienogranítico</i> Jacarandá Rosado .....	66
Figura 3.4 – Extração do corpo-de-prova com coroa diamantada de Ø15cm. ....	68
Figura 3.5 – (a) corpo-de-prova (face polida) e (b) Torno mecânico .....	68
Figura 3.6 - Seqüência dos rebolos abrasivos magnesianos (COBRAL) utilizados na indústria. ....	69
Figura 3.7 – (a) extração de corpo-de-prova do rebole abrasivo e (b) corpo-de-prova extraído .....	69
Figura 3.8 - SPR – (a) antes e (b) depois das modificações. ....	70
Figura 3.9 – Medição da rugosidade nos corpos de prova: (a) rugosímetro para placas de rochas e (b) rugosímetro adaptado para o estudo. ....	71
Figura 3.10 - <i>Glossmeter</i> : (a) vista frontal e (b) placa de metal com a abertura elíptica adaptada. ....	72
Figura 3.11 - Disposição das áreas de leitura do brilho das amostras ensaiadas. ....	72
Figura 3.12 - Trechos “A” e “B” onde são medidas as rugosidades (Rt) e no detalhe as estrias de rugosidade inicial. ....	73
Figura 3.13 - Detalhe do aparelho SPR. (1) Prato giratório, (2) Parafuso central, (3) Peso, (4) Pino Abrasivo e (5) Torneira de água. ....	73

Figura 4.1 - Espaços percorridos pelo rugosímetro (A e B) no sentido indicado pela seta. ....	75
Figura 4.2 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Vermelho Brasília.....	76
Figura 4.3 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Cinza Andorinha.....	77
Figura 4.4 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Jacarandá.....	78
Figura 4.5 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 1ª combinação.....	79
Figura 4.6 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 2ª combinação.....	80
Figura 4.7 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 3ª combinação.....	81
Figura 4.8 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 4ª combinação.....	82
Figura 4.9 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 5ª combinação.....	83
Figura 4.10 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 6ª combinação.....	84
Figura 4.11 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 7ª combinação.....	85
Figura 4.12 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 8ª combinação.....	86
Figura 4.13 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 9ª combinação.....	87
Figura 4.14 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Vermelho Brasília nas combinações 1, 2, 3 e 4 do polimento.....	88

Figura 4.15 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Vermelho Brasília nas combinações 5, 6, 7, 8 e 9 do polimento. ....	89
Figura 4.16 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Cinza Andorinha nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do polimento. ....	90
Figura 4.17 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Cinza Andorinha nas combinações 7, 8 e 9 do polimento. ....	91
Figura 4.18 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Jacarandá Rosado nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do polimento. ....	92
Figura 4.19 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Jacarandá Rosado nas 7, 8 e 9 do polimento. ....	93
Figura 4.20 - Discordância do ponto 3 da medida de brilho durante a 4ª combinação de polimento (1bar; 2min; 200rpm) do Monzogranito Cinza Andorinha. ....	94
Figura 4.21 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4minutos, 1bar, 200rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 24# e 36#. ....	94
Figura 4.22 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4minutos, 1bar, 200rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 60#, 120#, 220#, 400#, 600# e 800#. ....	95
Figura 4.23 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4minutos, 1bar, 200rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 1200# e lustro. ....	96
Figura 5.1 - Gráfico de perda de massa do “granito” Vermelho Brasília nas 9 combinações. ....	98
Figura 5.2 - Gráfico de perda de massa do “granito” Cinza Andorinha nas 9 combinações. ..	98
Figura 5.3 - Gráfico de perda de massa do “granito” Jacarandá Rosado nas 9 combinações. ..	99
Figura 5.4 - Valores médios de brilho dos três tipos de rochas estudadas nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6. ....	101
Figura 5.5 - Valores médios de brilho dos três tipos de rochas estudadas nas comb. 7, 8 e 9. ....	102

Figura 5.6 - Valores médios de brilho do “granito” Vermelho Brasília nas 9 combinações. 103	103
Figura 5.7 - Valores médios de brilho do “granito” Cinza Andorinha nas 9 combinações. .. 103	103
Figura 5.8 - Valores médios de brilho do “granito” Jacarandá Rosado nas 9 combinações. . 103	103
Figura 5.9 - Perda de massa x Brilho do “granito” Vermelho Brasília..... 104	104
Figura 5.10 - Perda de massa x Brilho do “granito” Cinza Andorinha..... 105	105
Figura 5.11 - Perda de massa x Brilho do “granito” Jacarandá Rosado. .... 106	106



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ensaio recomendado para a caracterização de rochas ornamentais (ARTUR e GALEMBECK, 2008).....	33
Tabela 2.2 - Classificação do coeficiente de atrito dinâmico, de acordo com as diretrizes da norma.....	38
Tabela 3.1 - Composição Mineralógica do <i>Sienogranito</i> Vermelho Brasília .....	63
Tabela 3.3 - Composição Mineralógica do <i>Monzogranito</i> Cinza Andorinha .....	65
Tabela 3.4 - Composição Mineralógica do <i>Migmatito Sienogranítico</i> Jacarandá Rosado. ....	67
Tabela 3.5 - Combinações do ensaio de polimento das amostras utilizando o Simulador de Polimento de Rocha (SPR).....	74
Tabela 4.1 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 1ª combinação (2min; 1bar; 200rpm). ....	79
Tabela 4.2 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 2ª Combinação (2min; 1bar; 400rpm). ....	80
Tabela 4.3 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 3ª Etapa do processo (2min; 1bar; 600rpm).....	81
Tabela 4.4 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 4ª Etapa do processo (4min; 1bar; 200rpm).....	82
Tabela 4.5 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 5ª Etapa do processo (4min; 1bar; 400rpm).....	83
Tabela 4.6 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 6ª Etapa do processo (4min; 1bar; 600rpm).....	84
Tabela 4.7 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 7ª Etapa do processo (6min; 1bar; 200rpm).....	85

Tabela 4.8 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 8ª Etapa do processo (6min; 1bar; 400rpm).....	86
Tabela 4.9 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 9ª Etapa do processo (6min; 1bar; 600rpm).....	87
Tabela 5.1 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Vermelho Brasília. ....	100
Tabela 5.2 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Jacarandá Rosado. ....	100
Tabela 5.3 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Cinza Andorinha. ....	100
Tabela 5.4 – Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Vermelho Brasília. ....	104
Tabela 5.5 - Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Cinza Andorinha. ....	105
Tabela 5.6 - Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Jacarandá Rosado.....	106

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Avaliador de Rugosidade de Chapas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Cinza Andorinha
Comb.	Combinação
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JR	Jacarandá Rosado
Min.	Minuto (s)
SPR	Simulador de Polimento de Rochas
VB	Vermelho Brasília



## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	i
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	ix
Sumário .....	11
<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>25</b>
1.1 Introdução.....	25
1.2 Objetivo da pesquisa .....	26
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
2.1 Emprego das Rochas Ornamentais.....	27
2.2 Cenário Geral do Setor de Rochas Ornamentais.....	28
2.3 Rochas Ornamentais.....	30
2.3.1 Granitos.....	31
2.4 Caracterização Tecnológica .....	32
2.4.1 Caracterização Petrográfica .....	33
2.4.2 Índices Físicos .....	34
2.4.3 Resistência à Compressão Uniaxial.....	35
2.4.4 Resistência à Tração na Flexão .....	36
2.4.5 Resistência ao Desgaste Abrasivo “AMSLER” .....	36
2.4.6 Resistência ao Impacto de Corpo Duro .....	36
2.4.7 Coeficiente de Dilatação Térmica Linear .....	37
2.4.8 Abrasão Profunda .....	37
2.4.9 Coeficiente de Atrito Dinâmico .....	38
2.4.10 Microdureza “Knoop”.....	38
2.5 Tecnologias de Beneficiamento .....	38
2.5.1 Extração .....	39
2.5.2 Serragem .....	40
2.5.3 Acabamentos superficiais de chapas .....	42
2.6 Polimento de Rochas Ornamentais .....	43
2.6.1 Fatores de Influência no Polimento .....	46
2.6.2 Abrasivos .....	47
2.6.3 Parâmetros analisados no processo .....	51

2.7	Simulador de Polimento de Rochas .....	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
3.1	Materiais Estudados .....	61
3.2	Características das Rochas Estudadas .....	61
3.2.1	Preparação dos corpos de prova .....	67
3.3	Abrasivos .....	68
3.3.1	Preparação do abrasivo .....	69
3.4	Condições Operacionais .....	70
3.4.1	Procedimento do ensaio .....	72
4	RESULTADOS .....	75
4.1	Rugosidade Inicial.....	75
4.2	Perda de Massa.....	79
4.3	Medidas de Brilho .....	88
4.4	Brilhos Pontuais .....	93
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
5.1	Rugosidade Inicial.....	97
5.2	Perda de Massa.....	97
5.3	Brilho .....	99
5.4	Perda de Massa x Brilho .....	104
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	109
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	111

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

---

## 1.1 Introdução

As rochas ornamentais e para revestimento compreendem os tipos litológicos comumente extraídos nas formas de blocos, cortados em diferentes formatos e beneficiados por esquadrejamento, polimento, lustro, entre outros.

O aspecto estético é o primeiro condicionante para seu uso nas edificações, seguido de suas qualidades adequadas conhecidas por meio de ensaios tecnológicos. Estas características condicionam a qualificação das rochas para serem utilizadas em revestimentos verticais de espaços internos e externos, e também em pisos de edificações, atendendo a alguns requisitos, tais como: alta resistência ao intemperismo, baixa capacidade de absorção de líquidos, altas resistências ao desgaste e à flexão e um aspecto estético agradável.

No mercado mundial, o Brasil que antes era um exportador de blocos, graças ao aprimoramento tecnológico dos últimos anos, vem aumentando a sua participação na exportação de produtos acabados, como exemplo, chapas brutas e polidas, ladrilhos, entre outros.

Apesar da expressiva melhoria na qualidade operacional das indústrias brasileiras, principalmente no que diz respeito à tecnologia do processo de serragem e polimento, ainda não é dada a devida importância ao desenvolvimento de pesquisas neste respeitável setor produtivo.

Por esta razão, o presente trabalho trata do estudo experimental do polimento em laboratório, procurando identificar as condições ideais do processo para os tipos de rochas estudadas, em função das suas diferentes mineralogias, estruturas e texturas.

No Capítulo 2 é feita uma revisão na literatura, sobre os aspectos que influenciam as varias etapas do processo de polimento, tanto para as rochas quanto para o abrasivo.

No Capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, bem como a descrição das rochas e do abrasivo utilizado. Nos Capítulos 4 e 5, são mostrados e discutidos os resultados e as conclusões encontram-se no Capítulo 6.

Esta pesquisa foi realizada no laboratório do Departamento de Geotecnia da EESC/USP e contou com a colaboração do Departamento de Mecânica e Metrologia da mesma instituição.

## 1.2 Objetivo da pesquisa

Identificar quais mecanismos influenciam na qualidade e no custo do polimento de diferentes tipos de “granitos”, na medida em que considera as características do material rochoso, como um dos principais elementos responsáveis pela qualidade final do polimento e fornecer subsídios para otimização do processo industrial.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

### **2.1 Emprego das Rochas Ornamentais**

Desde os tempos pré-históricos, as rochas têm sido utilizadas para as mais diversas finalidades. Elas viriam a ser usadas com função estética e ornamental ao redor de 3.000 a.C. pelos mesopotâmios, e como elementos estruturais pelos egípcios em grandes edificações, monumentos, templos, palácios, etc. Posteriormente, os gregos difundiram seu emprego por meio da arte de esculpir e da arquitetura e coube aos romanos o seu uso nas mais audaciosas obras públicas da Antigüidade. Por volta do ano 80 a.C., os romanos começaram a fazer uso na forma de placas em revestimento de grandes construções de alvenaria, principalmente por motivos estéticos e para dar a estas obras uma aparência grandiosa e duradoura, tornando-os assim, os pioneiros nesta modalidade.

A expansão comercial das rochas ornamentais e a decorrente diversificação de suas formas se deram no início do século XX, com o processo gradual de mecanização da indústria de extração e de beneficiamento. Em função da combinação de suas características tecnológicas, estruturais e estéticas, as rochas constituem um importante produto nas mais diversificadas áreas.

Segundo Abirochas (2009), atualmente o emprego das rochas na construção civil é quase que ilimitado, pois cerca de 80% da produção mundial de mármore e granito é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% desdobrada em peças para arte funerária e 5% para outros campos de aplicação. Já as rochas para revestimento, 60% delas referem-se a pisos, 16% a fachadas externas, 14% a interiores e 10% a trabalhos especiais de acabamento.

Recentemente, uma nova perspectiva para o uso da rocha ornamental é a utilização em projeto de urbanização e em vias públicas, uma especificação que permite os mais variados tipos de acabamentos. O uso da rocha na pavimentação de espaços públicos é uma tendência crescente e vem despertando o interesse de arquitetos no Brasil, uma vez que permite utilizar rocha com criatividade em projetos que oferecem beleza, durabilidade e facilidade de manutenção (CASTRO, 2009).

## 2.2 Cenário Geral do Setor de Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais são uma das áreas mais importantes do setor mineral. A partir da década de 20, apresentou em média, um crescimento de produção mundial estimado em 6% ao ano. No Brasil, este setor econômico foi um dos poucos em que as taxas anuais de produção cresceram, evoluindo de 1,8 milhões toneladas/ano na década de 20, para um patamar de 93 milhões de toneladas/ano em 2007 (ABIROCHAS, 2008a).

Dos maiores estados brasileiros exportadores de rochas ornamentais, o Espírito Santo é o que lidera o setor, respondendo em junho de 2009 por US\$ 7.512.689 (blocos), US\$ 35.609.238 (manufaturados) e US\$ 380.187 (outras rochas), totalizando US\$ 43.502.114, com 65,39% do faturamento das exportações. Em seguida, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Bahia, Ceará, Pernambuco, Paraíba e Paraná (ABIROCHAS, 2009).

Mesmo esta área sendo uma das mais promissoras do setor mineral, apresentou um declínio em suas exportações no primeiro semestre de 2008, devido à crise do mercado imobiliário dos Estados Unidos e sendo agravada pela desinformação do consumidor americano sobre notícias inverídicas com relação à exalação de radônio em granitos brasileiros. O tema tornou-se, portanto, motivo da mobilização de instituições e empresas brasileiras, considerando que o Brasil é hoje o maior exportador de rochas, tanto em valor como em volume físico, para o mercado norte-americano (ABIROCHAS, 2008b).

As exportações brasileiras, portanto foram afetados com a crise financeira mundial que atingiu a economia global como um todo e vários setores em particular. Atualmente há uma busca frenética por outros mercados. O mercado interno tem sido uma alternativa interessante, pois a construção civil esta aquecida. Até pouco tempo o uso das rochas era restrito às construções luxuosas, ultimamente está mais difundido e registra um acréscimo no consumo

residencial em pisos e revestimentos não só pelas qualidades e efeito estético, mas também pelo preço acessível, que foram pressionados para baixo devido ao redirecionamento para o mercado interno de muitas empresas exportadoras e a grande oferta de produtos (COSTA, 2009).

No período compreendido entre janeiro e maio de 2010, as exportações brasileiras de rochas ornamentais somaram US\$ 368,70 milhões, correspondentes à venda de 862.831,32 t de materiais brutos e processados. Frente ao mesmo período de 2009, registrou-se variação positiva de 54,75% no faturamento e de 55,38% no volume físico comercializado.

As rochas processadas compuseram 77,64%, do total do faturamento, e 48,34%, do total do volume físico, dessas exportações. A variação de vendas de rochas processadas, frente a 2009, foi de 49,54% no faturamento e de 41,51% no volume físico. Para as rochas silicáticas brutas (blocos de granito), esses índices de variação foram de respectivamente 76,41% e 71,95%. (ABIROCHAS, 2010).

Especificamente no mês de maio foram exportadas 214,1 mil toneladas, que resultaram em uma receita de US\$ 89,9 milhões. O faturamento e o volume físico das exportações de maio superaram o do mesmo mês em 2008 e 2009, ficando em 2010 apenas atrás do mês de março.

A Figura 2.1 mostra variação comparada da taxa de crescimento do valor das exportações brasileiras de rochas ornamentais no período de 2007 a 2010. A Figura 2.2 ilustra as exportações mensais do setor de rochas ornamentais no mesmo período.

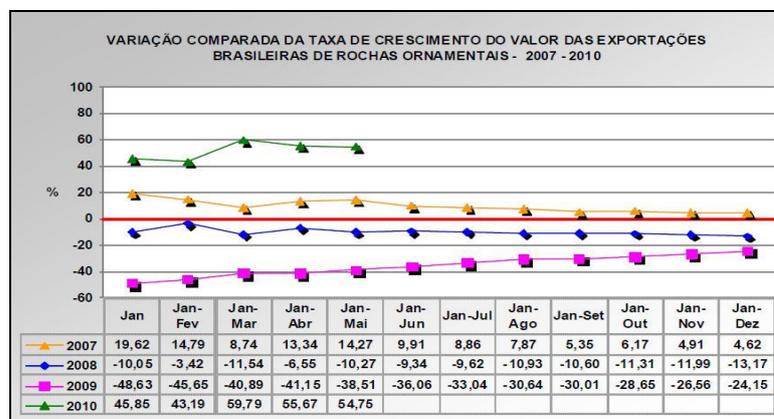


Figura 2.1 - variação comparada da taxa de crescimento do valor das exportações brasileiras de rochas ornamentais no período de 2007/2010 (ABIROCHAS, 2010).

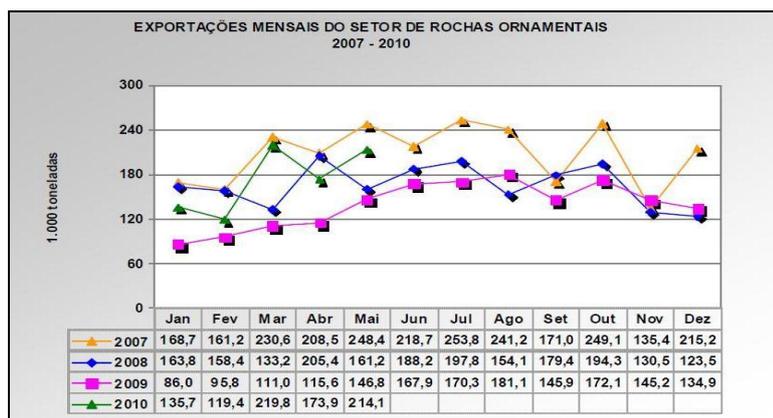


Figura 2.2 - Exportações mensais do setor de rochas ornamentais no período 2007/2010 (ABIROCHAS, 2010).

Apesar da variação negativa de crescimento das exportações ao longo dos seis primeiros meses de 2009 (Figura 2.1), elevou-se o patamar de variação das exportações de rochas de 2010. Tal elevação é motivada pela recomposição do estoque de chapas nos EUA e pela demanda de blocos da China (ABIROCHAS, 2010).

### 2.3 Rochas Ornamentais

De acordo com a NBR 15012 (2003), a rocha ornamental é definida como “material rochoso submetido a diversos graus de beneficiamento, utilizado para exercer função estética”. A rocha para revestimento é então definida como “rocha que, submetida a processos diversos e graus variados de desdobramentos e beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos e fachadas, em obras de construção civil”. Essa definição pode ser considerada similar à que a ASTM C 119 (2001) propõe para *Dimension Stone*: pedra natural que foi selecionada, regularizada ou cortada em tamanhos e formas especificados ou indicados, com ou sem uma ou mais superfícies mecanicamente acabadas.

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais são subdivididas basicamente em *mármore*s e *granitos*, numa designação mais ampla do que os termos petrológicos tradicionais (BRANDÃO *et. al.*, 1991). Os *mármore*s englobam as rochas carbonatadas, enquanto os *granitos* abrangem, genericamente, as rochas silicatadas (granitos, sienitos, charnoquitos, gabros, basaltos, arenitos, dioritos, etc.). Alguns outros tipos litológicos, incluídos também no

campo das rochas ornamentais, são os quartzitos, serpentinitos e ardósias, também muito importantes setorialmente.

As rochas como elementos duráveis e decorativos em revestimentos horizontais e verticais, têm a função de manter aspectos estéticos ao longo do tempo; proteger a estrutura do intemperismo; promover o isolamento térmico na edificação e também facilitar a limpeza, assim como, manter a higiene no ambiente (FRAZÃO; PARAGUASSÚ, 1998).

As rochas graníticas, devido a sua durabilidade, são bem aceitas no mercado mundial, principalmente as brasileiras, por terem uma enorme variedade de cores, padrões texturais e estruturais, merecendo assim um maior destaque.

### 2.3.1 Granitos

Os granitos são caracterizados como rochas ígneas ou intrusivas, formadoras da maior parte dos batólitos em núcleos de cadeias montanhosas. São compostas por cristais de feldspatos potássicos (ortoclásio ou microclínio), plagioclásio, quartzo e mica (biotita e muscovita) como minerais essenciais; e anfibólio, podendo aparecer como um mineral acessório.

A resistência ao desgaste abrasivo das rochas é proporcional à dureza (escala de Mohs) de seus minerais, assim a resistência nos granitos será maior quanto maior for à quantidade de quartzo presente na rocha, sendo este o mineral mais duro (dureza 7 na escala de Mohs). O desgaste também pode ser provocado por escarificação (arranque) dos grãos minerais, o que parece ser condicionado não à composição, mas à textura dos cristais.

São inúmeras as variedades dos granitos, sendo diferenciados na sua textura (grossa, média ou fina) e na sua coloração (avermelhada, rosada, amarela e cinza, etc.). Em geral, os granitos apresentam estrutura compacta, resistência mecânica relativamente alta, devido à sua homogeneidade, forte coesão dos constituintes minerais (textura) e pequena alterabilidade, justificando dessa maneira, sua grande utilização.

Diante de tantas solicitações a que os materiais rochosos necessitam atender, é necessária a determinação de sua caracterização tecnológica, que tem como finalidades principais a determinação das propriedades e parâmetros mais importantes para a utilização do material para fins de engenharia, e assim prever o seu comportamento ao longo do tempo.

## 2.4 Caracterização Tecnológica

Nas rochas ornamentais e para revestimento, o aspecto estético, também definido pelas propriedades intrínsecas, é o atributo mais utilizado e decisivo para escolha da rocha. Outro fator importante é o ambiente onde se encontra, pois o lugar em que esta será empregada determina o conjunto de solicitações a que será submetida. Portanto, são necessários também ensaios de alterabilidade para se ter um aspecto estético duradouro, pois as rochas quando submetidas ao uso podem sofrer as seguintes solicitações: Atrito e desgaste; Ataque por produto de limpeza; Impacto físico; Ação dos intempéries; Líquidos agressivos; Ar e gases poluentes.

Os materiais rochosos semelhantes a outros materiais de construção devem permanecer por um período economicamente razoável. Envelhecem com o passar do tempo e se degradam com maior ou menor proporção, dependendo da sua composição mineralógica e dos ambientes onde aplicados. Portanto, Navarro (2006) sugere que a durabilidade pode ser definida pelo estado de equilíbrio atingido pela rocha após a interação entre as propriedades petrofísicas e as solicitações do ambiente.

Para tanto, se faz necessário o conhecimento detalhado das propriedades tecnológicas das rochas que compreendem a aplicação de diversas técnicas, na maioria das vezes normalizadas. Estas técnicas são destinadas ao conhecimento das características dos materiais rochosos para a sua utilização na construção civil, além de outros tipos de uso, garantindo assim, uma boa durabilidade, segurança e economia.

Para a caracterização tecnológica das rochas ornamentais, são realizados alguns ensaios, como: caracterização petrográfica, índices físicos, resistência a compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, resistência ao desgaste abrasivo “Amsler”, resistência ao impacto de corpo duro, coeficiente de dilatação térmica linear, dentre outros não rotineiros como: abrasão profunda, coeficiente de atrito dinâmico e microdureza “Knoop”.

A Tabela 2.1, a seguir, mostra os ensaios recomendados para a caracterização das rochas ornamentais e de revestimento de acordo com a sua utilização.

Tabela 2.1 - Ensaios recomendados para a caracterização de rochas ornamentais (ARTUR e GALEMBECK, 2008).

<i>FASES ENSAIOS</i>	<i>Análise Petrog.</i>	<i>Índices Físicos</i>	<i>Resist. Desgaste</i>	<i>Resist. Impacto</i>	<i>Resist. à comp.</i>	<i>Resist. à Flexão</i>	<i>Módulo Deformab.</i>	<i>Dilatação Térmica</i>	<i>Alterab.</i>
Extração	X	x	x	X	-	-	-	-	-
Beneficiamento	X	x	x	X	x	x	x	x	X
Revestimento externo	X	x	x	-	-	x	-	x	X
Revestimento interno	X	x	x	-	-	x	-	x	-
Pisos	X	x	x	X	x	x	x	x	X
Colunas e Pilares	X	x	-	-	x	x	x	x	X
Pedestais	X	x	-	-	x	-	x	x	X
Tampos de mesa e balcões	X	x	x	X	x	x	x	x	X
Pias	X	x	x	X	x	x	x	x	X
Soleiras	X	x	x	X	x	x	x	x	X
Esculturas	X	x	x	-	-	-	-	-	X
Mesas e aparelhos de desempenho	X	x	x	X	x	x	x	x	X

#### 2.4.1 Caracterização Petrográfica

As análises petrográficas e mineralógicas das rochas permitem a identificação dos minerais (essenciais, acessórios e secundários); textura (forma e arranjo dos minerais); estado de alteração dos minerais (sãos ou alterados); estrutura (arranjo macroscópico) e do grau ou tipo de microfissuração (intercristalina ou intracristalina; fissuras abertas ou preenchidas), pois o uso inadequado dos materiais pétreos pode levar ao comprometimento da durabilidade e da estética, e, conseqüentemente, implicações de ordem econômica e de segurança.

Nas rochas ornamentais, a análise petrográfica por via direta é feita a partir de observações macroscópicas a olho nu ou pela microscopia óptica em lâminas delgadas com espessuras na ordem de 30µm, seguindo as diretrizes da NBR 15845 (ABNT, 2010), mostrada na Figura 2.3. O único método de investigação laboratorial que permite a visualização detalhada dos constituintes da rocha é a petrografia de seções delgadas, que consiste em avaliar as implicações de suas propriedades no comportamento posterior dos produtos aplicados.

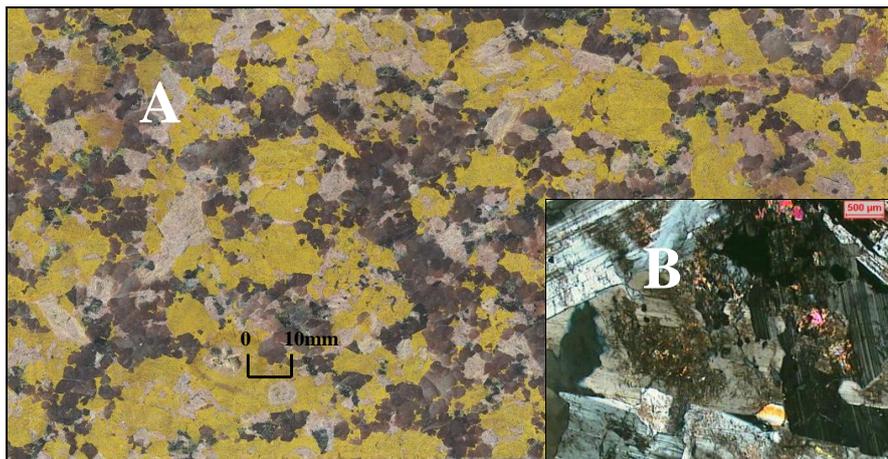


Figura 2.3 – Aspectos macroscópico (A) e microscópico (B) do *Sienogranito Vermelho* Brasília (RIBEIRO, 2008).

A caracterização é feita diretamente por microscopia óptica e quando não, por meio de análises indiretas, como: difratometria por raios X e análises térmicas diferenciais e químicas. Testes de coloração seletiva de feldspato complementam, quando necessário, a análise petrográfica quantitativa, como visto na Figura 2.3.

#### 2.4.2 Índices Físicos

O termo “Índices Físicos” envolve ensaios que definem as relações básicas entre massa e volume de um dado material, tais como massa específica ou densidade, porosidade e absorção d’água, os quais guardam uma grande interdependência entre eles. Estes ensaios são especificados segundo a NBR 12766 (ABNT, 1992e), sendo eles:

- Massa Específica e Porosidade

A rocha no seu estado natural apresenta-se como um conjunto de minerais interligados ocupando um determinado volume, formado pelos minerais e pelos os vazios entre eles. A maior ou menor quantidade de vazios no seu interior provoca uma maior ou menor compactidade da rocha, que refletirá numa maior ou menor massa específica e conseqüentemente, maior ou menor porosidade.

Existem diversas definições para massa específica e porosidade (real ou absoluta e aparente). Como massa específica real despreza o volume de vazio na rocha, observa-se, na prática, pouca importância nesse parâmetro, uma vez que não existe rocha com volume de

vazios igual a zero. A definição de massa específica aparente é mais aplicável às rochas por ser uma relação entre a massa da rocha no estado seco e o volume aparente da rocha (minerais e vazios). E a porosidade aparente, por sua vez, é também uma relação entre os volumes de vazios e volume da rocha.

- Absorção D'água

A capacidade da rocha de absorver e reter água nos seus poros é definido pela quantidade deste líquido necessário para preencher os vazios. A absorção pode ser obtida pela diferença entre o peso da rocha saturada e o peso da rocha seca, relacionado ao peso da rocha seca. A água não penetrará em todos os poros, pois muitos deles não são acessíveis, obtendo assim um valor de absorção menor que o valor da porosidade.

A absorção d'água nas rochas é muito importante, pois influencia diretamente em várias propriedades imprescindíveis, quando utilizadas como rochas de revestimento. As rochas com alta absorção d'água apresentam aumento na massa específica aparente saturada e na condutividade térmica, enquanto que a resistência mecânica diminui, por enfraquecer as ligações intergranulares.

### 2.4.3 Resistência à Compressão Uniaxial

A resistência à compressão uniaxial é determinada segundo a norma NBR 12767 (ABNT, 1992f), em uma prensa hidráulica servo-controlada com capacidade de 200 toneladas. Em relação à rocha movimentada, são coletadas amostras em duas direções: uma paralela ao plano de serragem e outra perpendicular a este plano. Tais direções não refletem a estruturação da rocha, mas sim o plano escolhido para a transformação em ladrilhos.

Os resultados da tensão de ruptura na compressão (C, em MPa), é determinada pela relação:

$$C = \frac{W}{A} \quad (1)$$

Onde: W – força de ruptura, em kN e A – área de carga do corpo de prova, em m<sup>2</sup>.

#### 2.4.4 Resistência à Tração na Flexão

A avaliação da resistência das placas rochosas à ruptura por flexão é cada vez mais importante frente às modernas técnicas de revestimento em pisos e fachadas. Estas técnicas envolvem fixação do revestimento através de anteparos metálicos, sem contato direto das chapas com a base do piso ou com a estrutura das fachadas. Nas duas situações verifica-se esforço de carga perpendicular à maior superfície da placa, pela pressão do vento nas fachadas e peso dos objetos colocados sobre os pisos. Também nas bancadas, a resistência à ruptura por flexão é fator muito importante para qualificação das rochas.

Os ensaios de flexão podem ser executados de acordo com dois procedimentos: o da norma NBR 12763 (ABNT, 1992b), efetuado em três pontos e designado “tração na flexão” e o da norma ASTM-C880 (2009), efetuado em quatro pontos (dois de ação e dois de reação), designado “resistência à flexão”.

#### 2.4.5 Resistência ao Desgaste Abrasivo “AMSLER”

O desgaste abrasivo é a propriedade que uma rocha possui de resistir à remoção progressiva de constituintes minerais de sua superfície, a qual pode ser medida por diminuição de volume ou de altura do corpo de prova ou por perda de massa. O processo mais comum para determinação do desgaste abrasivo em rochas para revestimento é o Teste “Amsler”, no qual mede a resistência dos materiais frente à solicitação abrasiva, de acordo com a norma NBR 12.042 (ABNT, 1992a).

A resistência ao desgaste é normalmente proporcional à dureza, na escala de Mohs, dos minerais constituintes da rocha. Portanto, como função da dureza dos minerais, os granitos mostram maior resistência ao risco (arranhões) e ao desgaste abrasivo, sendo por isto idealmente especificados para pisos, sobretudo nos casos onde espera-se grande tráfego de pedestres.

#### 2.4.6 Resistência ao Impacto de Corpo Duro

Para utilizar uma rocha na construção civil é muito importante saber a resistência ao impacto de um corpo duro, pois simula a queda de um objeto no piso. Este ensaio possibilita a obtenção de informações relativas ao grau de tenacidade de um material rochoso, e,

conseqüentemente de sua capacidade de suportar ações mecânicas instantâneas (VIDAL, BESSA & LIMA, 1999).

Regido pela norma NBR 12764 (ABNT, 1992c), este ensaio tem o objetivo de simular a queda de objetos em um piso e observar os danos causados e tem importância para rochas a serem empregadas nos revestimentos de pisos, paredes até 1,5 m de altura, degraus, soleiras, mesas, balcões, pias e outros.

#### 2.4.7 Coeficiente de Dilatação Térmica Linear

Como materiais naturais sólidos, as rochas se dilatam e comprimem respectivamente pelo aumento e diminuição da temperatura. Em climas tropicais e subtropicais, como o do Brasil, as temperaturas mínimas raramente atingem o ponto de congelamento da água, não havendo, portanto, maiores problemas com perda de resistência físico-mecânica, decorrente da tensão de vazios, provocada pelo gelo nos interstícios das rochas.

Sendo, no entanto, elevadas as temperaturas máximas, verifica-se um processo sensível de dilatação das rochas aplicadas, sobretudo em revestimentos de pisos e fachadas sujeitos à insolação.

O coeficiente de dilatação térmica, aferido para os diferentes tipos litológicos, permite definir o espaçamento mínimo de  $8,105 \times 10^{-3} \text{ mm/m} \times ^\circ\text{C}$ , recomendável entre as chapas de um revestimento, de forma a se evitar o seu contato, compressão lateral e embricamento (MOREIRAS, 2005).

No Brasil, os ensaios de caracterização do coeficiente de dilatação térmica linear são executados com dois corpos de prova de formato cilíndrico, aquecidos em água de  $0^\circ$  a  $50^\circ\text{C}$  e novamente resfriados até  $0^\circ\text{C}$ , de acordo com a norma NBR 12765 (ABNT, 1992d). Os resultados desses ensaios são expressos em  $(\text{mm/m} \times ^\circ\text{C}) \times 10^{-3}$ .

#### 2.4.8 Abrasão Profunda

Inicialmente desenvolvido para ladrilhos cerâmicos, o ensaio de abrasão profunda tem a finalidade de medir o comprimento da ranhura provocada por um disco de aço em uma superfície plana de um corpo de prova, utilizando-se a máquina Capon, seguindo as diretrizes da norma NBR 13818 (ABNT, 1997a).

#### 2.4.9 Coeficiente de Atrito Dinâmico

O coeficiente de atrito dinâmico tem como definição a relação entre a força tangencial e a força vertical, que atuam sobre a superfície ensaiada. Para a sua avaliação, é utilizado um equipamento denominado “Scivolosímetro” que dispõe de um deslizador motorizado tipo “Tortus” que se movimenta com velocidade constante sobre a superfície ensaiada seca e molhada, de acordo com as diretrizes da norma NBR 13818 (ABNT, 1997b).

O valor do coeficiente de atrito é classificado conforme as especificações da Tabela 2.3.

Tabela 2.2 - Classificação do coeficiente de atrito dinâmico, de acordo com as diretrizes da norma.

<b>COEFICIENTE DE ATRITO (adimensional)</b>	<b>USO</b>
<b><math>\mu &lt; 0,4</math></b>	Satisfatório para instalações normais
<b><math>\mu &gt; 0,4</math></b>	Recomendado para uso onde se requer resistência ao escorregamento

#### 2.4.10 Microdureza “Knoop”

A determinação da microdureza Knoop consiste em um teste de dureza de micro impressão, em que essa é determinada como sendo a área produzida por uma ponta de diamante (de formato losangular), dividida pela carga utilizada, para produzir uma impressão na superfície avaliada (QUITETE, 2002). Assim, quanto maior a impressão produzida, menor a dureza de micro impressão.

### 2.5 Tecnologias de Beneficiamento

Seja qual for à aplicação das rochas ornamentais, o ciclo produtivo pode ser dividido em três etapas bem definidas: extração (remoção de produto útil e economicamente viável de maciços rochosos ou matacões), serragem de blocos e operações de polimento “resinagem” e lustro.

### 2.5.1 Extração

A extração (ou lavra) de blocos é definida como a remoção de um produto útil ou economicamente viável de maciços rochosos (Figura 2.4a) ou matacões (Figura 2.4b). Nesta etapa do beneficiamento é obtido blocos de dimensões variadas.

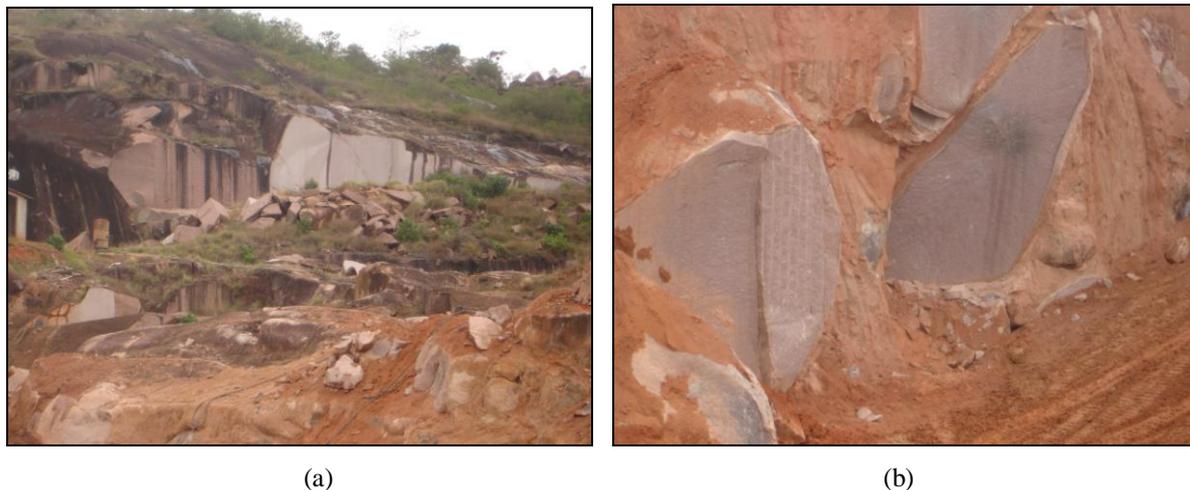


Figura 2.4 - (a) Extração em maciços rochosos e (b) Extração em matacões, Bragança Paulista - SP.

Os matacões constituem porções específicas de um maciço rochoso, individualizados a partir da atuação de agentes intempéricos nas fraturas e destacados por erosão. Sua forma, normalmente arredondada, é devida à esfoliação esferoidal concêntrica (acebolamento), estando por isto, muitas vezes deslocados, através de rolamento, da sua posição original. Estes devem ter dimensões apropriadas e quantidade suficiente para desdobrar um número razoável de blocos. E, um aspecto a salientar é que os depósitos sob a forma de matacões têm vida útil bastante limitada, salvo algumas raras exceções.

Os componentes funcionais da operação de lavra de maciços rochosos incluem degraus, praça principal, praças secundárias, pistas, rampas e frentes. Os degraus representam a figura elementar da exploração, definida pela altura e topo de bancada que sofrerá desmonte. A praça principal é o espaço onde efetua o esquadreamento final dos blocos e as operações necessárias para seu transporte, localizando-se normalmente na base da pedreira. As praças secundárias destinam-se às operações funcionais de apoio ao desmonte. As pistas e as rampas constituem as vias de ligação entre as praças, sendo as pistas trafegadas por veículos de rodas pneumáticas e as rampas apenas por veículos de esteiras. A frente geral é

definida como o limite amplo da lavra, enquanto a frente de exploração é aquela atacada num determinado momento.

É importante ressaltar também, que a configuração da lavra de maciços rochosos é basicamente determinada pela inclinação do terreno. Para superfícies horizontais/subhorizontais, características de planícies e de platôs elevados, a cava pode ser do tipo fossa ou do tipo poço. Para superfícies com grau de inclinação mais acentuado, definidas nos relevos de terrenos acidentados, a lavra pode evoluir por desabamento ou por tombamento do material da encosta.

A lavra de matacões tem menor custo de produção, mas determina fortes restrições quantitativas e qualitativas de suprimento, resultando ainda em grande impacto paisagístico e danos consideráveis ao meio ambiente. Já na lavra de maciços rochosos o custo de produção é superior, mas sua prática proporciona melhor controle de qualidade e melhores taxas de recuperação dos materiais, garantindo o suprimento do mercado, firmando a comercialização e causando menor degradação ambiental.

### 2.5.2 Serragem

O processo de serragem é obtido através do desdobramento de materiais brutos, extraídos de pedreiras em forma de blocos, onde são transformados em chapas de espessuras variadas. Nesta etapa, as chapas apresentam espessuras próximas as do produto final.

Geralmente são extraídos blocos das pedreiras com um volume variável entre  $5\text{m}^3$  e  $8\text{m}^3$ , podendo chegar, excepcionalmente, a  $12\text{m}^3$ . No entanto, materiais especiais com alto valor comercial permitem o aproveitamento de blocos de até  $1\text{m}^3$ . Após o esquadrejamento feito na própria pedreira, ou após ter sido refileado com máquina monolâmina ou por meio de fio diamantado, o bloco é dirigido à etapa de serragem para ser beneficiado.

As máquinas utilizadas para o desdobramento destes blocos são denominadas de “teares” (Figura 2.5a) como mostrados em detalhes a seguir na (Figura 2.5b). O processo de serragem nos teares é auxiliado por uma polpa de água, cal e granalha, derramada continuamente sobre a carga, para otimização do corte e resfriamento das lâminas.



(a)

(b)

Figura 2.5 - Visita técnica na Marmoraria Braminas em Bragança Paulista-SP: (a) vista frontal dos teares e (b) detalhe do desdobramento do bloco.

Os teares mais modernos dispõem de equipamentos que controlam automaticamente a alimentação e a mistura da polpa abrasiva, pois a alimentação deve ser constante e a viscosidade não pode ser excessiva. Não é correto serrar, na mesma carga, blocos com diferentes alturas, durezas e espessuras, podendo provocar dessa maneira, um desgaste diferencial das lâminas, vibração do equipamento, má planicidade das chapas e até mesmo a fragmentação do material.

Comercialmente os equipamentos estão divididos em duas principais categorias, dependendo do tipo de material a ser serrado:

- Teares para mármore, com cinemática retilínea, lâminas diamantadas e são operados com irrigação;
- Teares para granito, com cinemática pendular ou semi-retilínea, que usam granalha metálica e são operados com lama abrasiva.

Atualmente os teares com média de serragem de até 60 placas por vez, já podem ser substituídos por máquinas com maior capacidade de obtenção de chapas, devido ao acréscimo de lâminas, conseguindo desta forma uma diminuição de custos na indústria.

### 2.5.3 Acabamentos superficiais de chapas

Dentro das formas de acabamentos das superfícies das rochas, além do polimento, existem mais três tipos bem definidos, como: apicoamento, levigamento, flamejamento e finalmente, polimento ou lustro, que serão descritos a seguir:

- Apicoamento: habitualmente feito de maneira manual, com picão, mas também pode ser feito mecanicamente. É indicado somente para granitos com espessura igual ou superior a 2,0cm.
- Levigamento: a superfície é desbastada com abrasivos de granulometria grosseira, para eliminação das rugosidades mais acentuadas, obtendo-se uma superfície plana, porém de acabamento rústico e também revelando com maior clareza as cores da rocha.
- Flamejamento: a placa é exposta ao fogo, o que faz com que o quartzo se desprenda conferindo um aspecto rugoso e ondulado à superfície (Figura 2.6a) e o detalhe deste processo (Figura 2.6b). O tratamento com fogo só pode realizado em granitos com espessura igual ou superior a 3,0 cm.

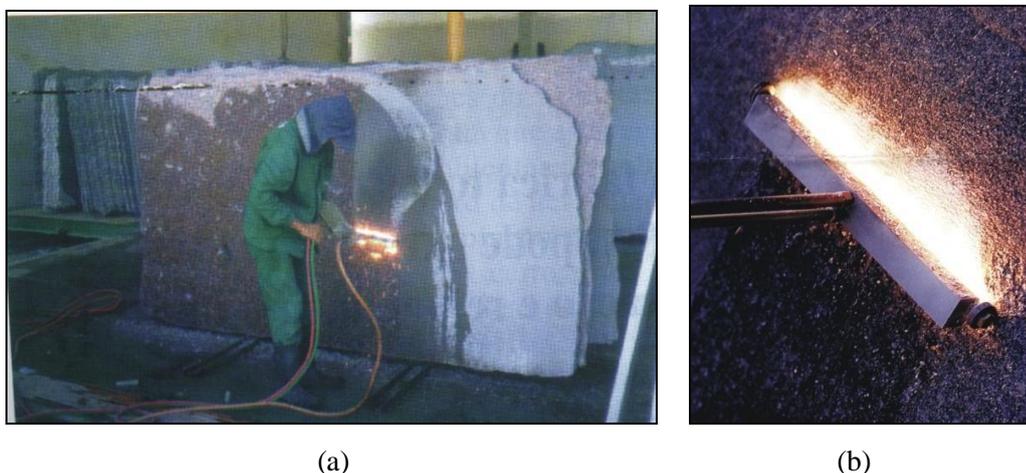


Figura 2.6 - (a) Processo de flamejamento nas placas de rochas ornamentais e (b) detalhe do processo (ARTUR; GALEMBECK, 2008).

- Polimento ou lustro: a partir da abrasão, os poros da superfície são fechados, obtendo uma superfície plana e sem brilho, conforme indicado na Figura 2.7a. Em seguida, pode ser lustrada para adquirir aspecto espelhado adicionando-se resina, que

diminui a porosidade da rocha atingindo o máximo de brilho possível, como mostra a Figura 2.7b.



Figura 2.7 - (a) Polimento na superfície da placa de rocha e (b) adição de resina.

## 2.6 Polimento de Rochas Ornamentais

O beneficiamento final de rochas ornamentais pode ser entendido como todas as tecnologias aplicadas nos processos que conferem as características dimensionais de conformação e especificação do produto final. Nesse estágio se reúnem os métodos de acabamento de superfície, o corte e os arremates das bordas.

No polimento, o brilho e o lustro das chapas são realizados através da eliminação das rugosidades que estão presentes nas superfícies das chapas decorrentes do processo de corte, juntamente com a eliminação de poros dos diferentes minerais ou cristais que constituem a rocha (KASCHNER, 1996).

Os equipamentos utilizados no desgaste das rochas, conseqüentemente no processo de polimento são chamados de politrizes. Existem diversos modelos de politrizes disponíveis no mercado, tais como:

Politrizes manuais de bancada fixa: foram os primeiros equipamentos utilizados no polimento de chapas e podem ser encontrados até os dias atuais em pequenas marmorarias. Esta politriz é constituída por uma coluna que sustenta um braço, o qual tem na sua

extremidade o conjunto cabeçote onde são fixados os rebolos abrasivos. As chapas são colocadas deitadas sobre uma bancada fixa de concreto, construída ao lado da coluna de sustentação do braço da politriz, conforme ilustra a Figura 2.8.

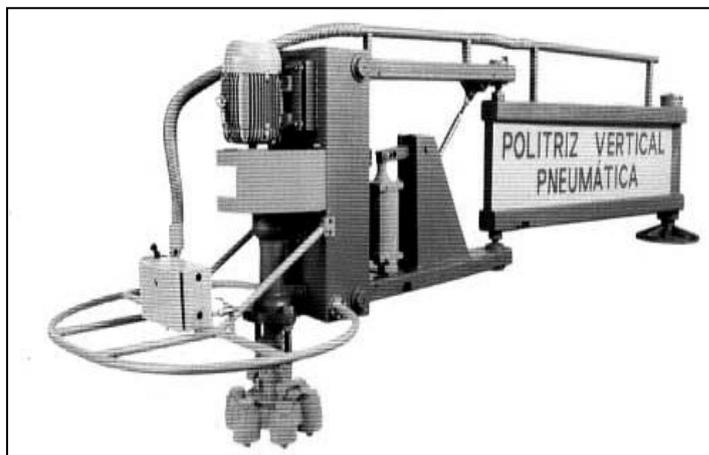


Figura 2.8 - Modelo de politriz manual (CETEMAG, 2003).

Por depender exclusivamente da ação de um operador, a pressão inserida no cabeçote e a direção do seu movimento sobre a superfície irão interferir na qualidade do polimento ao longo de uma mesma chapa. Para empresas de beneficiamento que queiram trabalhar com produtos de alta qualidade e alto nível de produção, este tipo de equipamento não é indicado. No entanto, é comum a presença desta politriz em grandes e modernas indústrias, pois há sempre um volume de chapas com deformidades originadas na serragem e a existência de micro trincas, onde o risco de quebra é bem maior.

Politriz de ponte móvel com bancada fixa: este equipamento é constituído por um conjunto moto redutor, que ativa um cabeçote de polimento, suportado por uma ponte que se desloca sobre trilhos, como visto na Figura 2.9. Com esta máquina é possível obter uma variedade de movimentos simultâneos sobre a superfície a ser polida, assemelhando-se à operação da politriz manual, máquinas antigas usadas somente em empresas de pequena escala de produção, tendo como diferencial uma pressão de trabalho regular, constante e mais elevada.



Figura 2.9 - Politriz de ponte móvel (CETEMAG, 2003).

O avanço tecnológico no processo com a politriz de ponte fixa foi notório, entretanto apresenta algumas limitações quanto à produtividade, à qualidade e a uniformidade no acabamento. Dentre essas limitações estão incluídas a troca de abrasivos, de cabeçotes e um tempo elevado de parada entre cargas das chapas na bancada. Neste método, a percepção do operador continua sendo muito importante para que o polimento seja uniforme entre as chapas de um mesmo material.

Politriz multicabeças: o grande avanço tecnológico veio no final dos anos 70, com a politriz composta por esteiras que transportam as chapas, sobre a qual é montada uma trave que sustenta os conjuntos moto redutor e cabeçote (Figura 2.10). A politriz confecciona chapas com brilho bastante uniforme e de alta qualidade. Isto se deve a conjugação do movimento da esteira, ao movimento de rotação dos cabeçotes e ao movimento transversal da trave, que proporciona todos os movimentos necessários ao processo de polimento. Para os granitos, a produtividade desses equipamentos pode chegar à 40m<sup>2</sup> por hora (COIMBRA FILHO, 2006).



Figura 2.10 - Politriz Multicabeças (Braminas, Bragança Paulista - SP).

A politriz multicabeças possui um nível de automação bastante elevado e fornece facilidades operacionais, como velocidades de esteira e trave programadas, sinal que indica o fim dos abrasivos em cada cabeçote. Todo este processo ocorre sem o auxílio do operador e, além disso, essas politrizes são equipadas com microprocessadores que disponibilizam para o usuário, informações sobre o processo, tais como: tempo de trabalho e paradas, quantidade polida e consumo de abrasivo.

### 2.6.1 Fatores de Influência no Polimento

Algumas características da rocha tais como: dureza, rugosidade, microfissuras, etc., são de fundamental importância para a compreensão do processo de polimento de rochas ornamentais. Portanto, os 3 fatores que influenciam no polimento, são:

- Qualidade da Serrada

O processo de serragem proporciona à placa uma determinada rugosidade que depende da qualidade de corte sofrida pelo bloco. Quanto melhor for a serrada do material, menos rugosa será a chapa, portanto menor o gasto com abrasivos no processo de polimento.

De acordo com Cetemag (2003) para analisar a qualidade da serrada, deve-se:

- Com auxílio de uma régua de alumínio, percorre-se por toda a extensão da chapa nas direções horizontais, verticais e diagonais para verificar se existe algum empeno;
- Observar a existência de canaletas e entradas de lâminas nas cabeceiras de chapas, causadas por mal tensionamento de lâminas ou quebra de bico de lâminas inadequada.

- Dureza dos granitos

Em função do tipo de granito considerado pela indústria como “duro”, “médio” e “macio”, como por exemplo: Vermelho Brasília “duro”, Verde Labrador “médio” e Preto Indiano “macio” são estabelecidos uma seqüência correta dos grãos abrasivos, levando em consideração a dureza e o grau de dificuldade de fechamento entre as fases do mineral presente na rocha. Esta classificação é feita empiricamente através das características operacionais, tais como tempo gasto na serrada, velocidade de polimento e consumo de abrasivos, não sabendo ao certo quais características das rochas que poderão influenciar neste processo.

- “Fechamento do polimento”

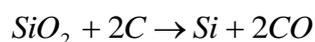
O fechamento do polimento é uma característica relacionada aos espaços e às depressões que algumas placas já polidas podem apresentar. Este fator está diretamente relacionado com a mineralogia, o tamanho dos cristais, a direção de corte em relação à orientação dos cristais, o preenchimento de micro e macro discontinuidades, bem como textura, arranjo do mineral, grau de alteração, entre outros. Nos granitos, exclusivamente, as variáveis que mais influem nas propriedades mecânicas são o tamanho e o formato dos grãos, grau de embricamento, tipo de contato e a composição mineralógica. O sienito, por sua vez, ausente de quartzo (mineral de alta dureza) tende a ter bom fechamento (SILVEIRA; RODRIGUES; PARAGUASSÚ, 2008).

Para tal processo, são utilizados materiais abrasivos, que a partir do atrito gerado pela ação destes, em movimento sobre a placa, ocorre a transformação da superfície rugosa e opaca, em uma superfície plana e com brilho. Através desse desgaste são ressaltadas a coloração, a textura e a aparência do material. Os rebolos abrasivos apresentam granulometria decrescente durante as etapas até atingir o lustro desejado. Neste método a escolha do tipo de abrasivo, a carga aplicada, a velocidade de rotação e a velocidade de avanço da placa são as variáveis de grande importância no acabamento final das placas.

### 2.6.2 Abrasivos

O termo abrasivo é considerado por Stachowaiak e Batchelor (1993) como sendo uma partícula ou grão, capaz de causar rápido ou eficiente desgaste em uma superfície sólida. Atualmente os abrasivos para o polimento no setor de rochas ornamentais são divididos em 3 grupos:

- Abrasivos Magnesianos: nos abrasivos magnesianos são utilizados como ligante o óxido de magnésio e como elemento abrasivo o carbetto de silício (SiC), por ser um elemento muito duro (9,5 na escala de Mohs), infusível e quimicamente inerte. Este composto é produzido a partir do aquecimento de quartzo ou areia com excesso de coque, num forno elétrico a 2.000 – 2.500 °C, de acordo com a seguinte reação:



Para o beneficiamento de chapas de rocha, esses abrasivos são fabricados em todas as granas necessárias, que vai desde a grana 16# a 1200# *mesh*. Esses abrasivos são destinados as máquinas de polimento manual ou semi-automático ainda bastante encontrados no mercado.

- Abrasivos Diamantados: são fabricados em liga de ferro e cobalto ou em resina. Estes abrasivos são os que representam a evolução tecnológica em relação ao polimento de rochas. As vantagens da sua utilização em máquinas multicabeças são: aumento de produtividade e qualidade final; melhoria na qualidade do corte e da água reciclada; redução de energia elétrica e redução do tempo morto de produção, dentre outras vantagens.

- Abrasivos Resinóides: também considerados abrasivos diamantados resinóides (ADRs), por serem produzidos com ligas de resinas especiais que aglomeram partículas de diamante com maior poder de abrasão, proporcionando uma melhor qualidade em fechamento e brilho final dos granitos. Além disso, são mais duráveis e têm menor custo por m<sup>2</sup>. Sua granulação varia de 120# a 1500# *mesh*.

Responsáveis pelo desgaste, polimento e lustro das rochas ornamentais, os abrasivos são peças fundamentais no acabamento das placas. As empresas estão inovando com modelos cada vez mais eficientes. Vale ressaltar também, que a linha de abrasivos varia de indústria para indústria.

#### 2.6.2.1 Principais fatores que influenciam na abrasividade

A abrasividade é a capacidade de um abrasivo de remover o material submetido ao processo de desgaste. A seguir serão citados os principais fatores que influenciam na abrasividade.

- Dureza dos minerais

A dureza depende da estrutura atômica dos minerais, pois quanto mais forte for a união entre os átomos, mais duro será o material (DANA, 1983). Portanto, a dureza é a resistência que uma determinada superfície oferece ao risco, sendo considerada como uma das propriedades mais importantes do material que sofre o desgaste. Quando se trata de dureza, pode-se referenciar tanto ao abrasivo, quanto ao material a ser desgastado.

Os minerais podem ser considerados essenciais e secundários, ou seja, aqueles em que a natureza e a sua quantidade permitem classificar a rocha e também àqueles formados a partir da alteração de minerais preexistentes (FRAZÃO, 2002). O quartzo, como exemplo dos minerais essenciais, é considerado o mineral mais duro, atingindo o grau 7 na escala de Mohs.

Nas rochas ornamentais a técnica mais utilizada é a determinação da dureza por microindentação, também conhecida por microdureza *Knoop* (já visto no item 2.4.10). O setor ceramista constatou uma menor dispersão dos valores de dureza *Knoop* em relação à dureza *Vickers*, para os mesmos materiais. Vale lembrar ainda que, a ponta deste último não apresenta um bom resultado em materiais não maleáveis, a saber: vidro, cerâmica, e minerais não metálicos, a maioria dos minerais encontrados em rochas ornamentais (QUITETE, 2002).

- Dimensão das Partículas

Quanto maior o tamanho da partícula, maior a taxa de desgaste. Isso é devido a uma remoção mais eficiente de material diante da maior carga exercida por cada partícula de abrasivo, que quando sob as mesmas condições de ensaio, tem seu tamanho aumentado (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1993). De modo geral, pode-se dizer que a resistência ao desgaste é inversamente proporcional ao tamanho do abrasivo.

Os mesmos autores afirmam que, durante a abrasão, o tamanho das partículas pode variar de acordo com as solicitações aplicadas no sistema, como demonstra a Figura 2.11. Partículas muito duras e frágeis tendem a diminuir de tamanho, conseqüentemente sua capacidade de desgaste. Partículas de alta tenacidade podem provocar arestas de corte arredondadas, deixando assim de remover o material por microcorte e, partículas com propriedades intermediárias duras, porém não tão frágeis, podem ter arestas de corte renováveis durante seus movimentos, permitindo assim um desgaste rápido do material em contato.

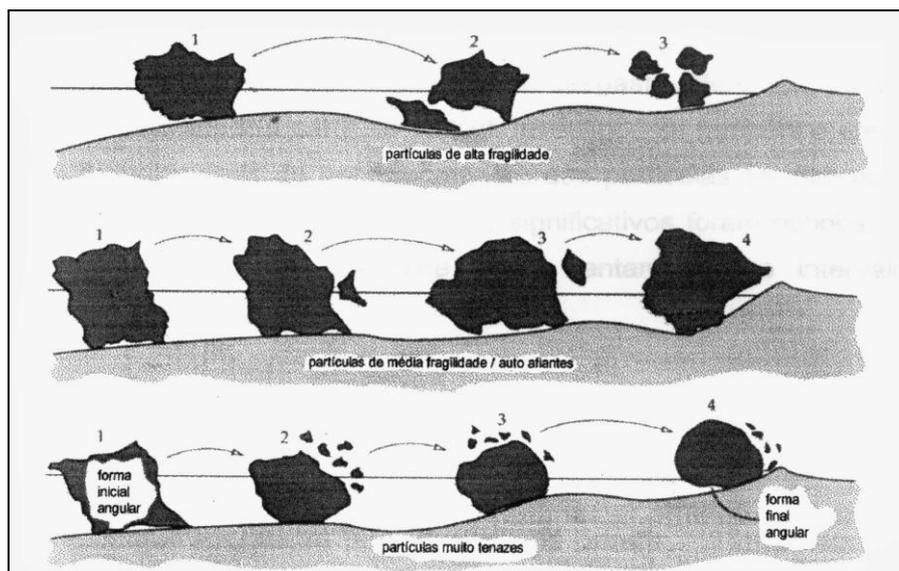


Figura 2.11 - Efeito da tenacidade e da fragilidade da partícula sobre sua eficiência em desgastar (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

- Velocidade relativa e Carga aplicada

No estudo de desgaste por abrasão de rochas ornamentais é de fundamental importância conhecer a relação entre a influência da carga aplicada e a velocidade relativa entre as partículas abrasivas que sofrem o desgaste.

Segundo Silveira (2007), um dos primeiros trabalhos acerca deste assunto foi o de Haworth em 1949 no qual, testando amostras temperadas de aço SAE 1045, mudou a carga e a velocidade da roda de borracha. Neste trabalho foi possível notar que a mudança na velocidade de 250 rpm para 1035 rpm, mantendo-se constante os outros parâmetros, gerou um aumento de aproximadamente duas vezes na taxa de perda de massa, enquanto que duplicando-se a carga e mantendo-se a velocidade constante a 250 rpm, o valor da taxa de desgaste do abrasivo foi ampliado em duas vezes e meia.

- Temperatura

Em geral, o aumento da temperatura causa uma redução na dureza do material. De acordo com Frazão (2002) a mica (mineral essencial nas rochas graníticas) é um exemplo clássico, sendo bastante sensível a temperaturas elevadas, degradando-se pela perda de água. Portanto é de se esperar que a temperatura interfira na resistência ao desgaste dos materiais.

A água nesta etapa de desbaste é fundamental e, sua eficiência está na refrigeração durante o processo de polimento para diminuir a temperatura de atrito entre rebolo abrasivo e a rocha, para a remoção dos detritos deixados pelos fragmentos de rocha e abrasivo, assim como na limpeza entre as trocas de abrasivos no final de cada etapa (CETEMAG, 2003).

Quantificar o efeito da temperatura na abrasão, ainda não é um assunto muito explorado, pois inúmeras dificuldades são encontradas pelos laboratórios para adequar as máquinas de tal maneira a realizarem ensaios a temperaturas controladas (SILVEIRA, 2007).

### 2.6.3 Parâmetros analisados no processo

Nas rochas ornamentais, os processos de polimento e lustro, são constituídos por uma série de operações que reduzem a rugosidade da superfície serrada para conferir maior intensidade de brilho. Isto é feito por meio de abrasivos com diferentes granulações, que conduzidos em movimento de fricção sobre a rocha e de maneira decrescente, vão desbastando até atingir o brilho desejado. Para tal processo são avaliados o brilho, a rugosidade e o desgaste de cada material individualmente.

- Brilho

O brilho é conhecido pelo aspecto geral de um mineral quando se reflete a luz, podendo ser dividido em metálico e não-metálico (DANA, 1959).

De acordo com Erdogan (2000) devem-se conciliar o processo de polimento com os métodos de análise de imagens. Esse método consiste em um sistema que utiliza luz refletida à 60 graus em uma chapa, sendo o brilho captado por uma câmera de vídeo com alta definição, que conectada a um computador transfere dados para a obtenção de gráficos. Estes gráficos mostram os valores de brilho inversamente proporcionais à rugosidade das chapas. Sendo assim, quanto maior o brilho menor a rugosidade. As variáveis que influenciam no brilho são: micro e macro-poros, fissura de borda de grãos, fissura intracristalina e fissura de clivagem.

Existem várias técnicas para a medição de brilho em superfícies de rocha polida, a mais usada devido a sua definição é o *glossmeter*, ilustrado na Figura 2.12. Este equipamento foi desenvolvido com base no procedimento padrão ditado pela ASTM D 523-94. Os medidores de brilho foram desenvolvidos primeiramente para superfícies metálicas

homogêneas, sendo posteriormente também utilizados com frequência no setor de rochas ornamentais.

O índice de brilho exigido pelos consumidores deve ser igual ou superior à 70 pontos medidos na escala do aparelho, que pode chegar até 100 pontos. Quanto maior a heterogeneidade das feições estéticas (movimentos) de uma rocha, maior o número de medidas necessárias para uma média representativa.



Figura 2.12 - Aparelho usado na medição do brilho “glossmeter”.

- Rugosidade

A textura ou rugosidade superficial são imperfeições caracterizadas pelas micro-irregularidades geométricas deixadas na superfície das placas, decorrentes da primeira etapa de beneficiamento, que durante o polimento vão sendo extraídas devido o desgaste provocado pela politriz (CARPINETTI; GONÇALVES FILHO; PORTO, 1996).

Estes mesmos autores definem que, a rugosidade de uma superfície é basicamente quantificada por meio de parâmetros relacionados à altura (amplitude) e largura (espaçamento) das irregularidades, ou mesmo a combinação desses atributos.

Os diferentes sistemas de medida da rugosidade foram divididos de acordo com a proposta de Grasselli (2001) tendo sido abordados diversos aspectos, tais como: velocidade do sistema, precisão e resolução das medidas e duração das mensurações e da análise dos dados. São eles:

## 1. Sistema bidimensional (2D)

Com contato: perfilômetros com apalpador e perfilômetros com *stylus* tipo agulha.

Sem contato: perfilômetros a laser, equipamentos pneumáticos e sistemas acústicos e ultrassônicos.

## 2. Sistema tridimensional (3D)

Com contato: máquinas de medição

Sem contato: fotogrametria, interferometria e câmeras digitais de alta precisão.

O processo de serrabilidade industrial de rochas graníticas, a rugosidade das superfícies serradas está diretamente ligada tanto com as condições operacionais como as características da rocha. Sua determinação pode ser feita com perfilômetros de medições diretas e indiretas (RIBEIRO *et al.*, 2005). Outra maneira é por meio da determinação do coeficiente de atrito dinâmico da superfície já mostrado anteriormente.

No departamento de Geotecnia da Universidade de São Paulo – USP de São Carlos foi desenvolvido por Paraguassú *et. al.* (2004) e aprimorado por Ribeiro *et. al.* (2005), um perfilômetro portátil de alta precisão para medir a rugosidade de forma aceitável pelo mercado e prever, de forma não empírica, o custo de polimento das chapas serradas, verificar possíveis empenamento, bem como as medidas do desgaste de pisos de edificações já existentes.

O aparelho desenvolvido para a utilização direta na indústria, denominado “ARC - Avaliador de Rugosidade de Chapas” ou Rugosímetro é ilustrado na Figura 2.13. Este equipamento é constituído por um corpo de aço (1); com pés ajustáveis com parafuso para o nivelamento do sistema (2); carro de medição (3) com um defletômetro digital acionado por um sistema de braços ortogonais interligados; em que um deles é fixada a ponta de vídea que toca a superfície da chapa (ver detalhe). O carro de medição é deslocado por meio de uma rosca sem fim acionada manualmente contando-se os giros em um cilindro graduado (4). Por meio de uma conexão (5) e uma interface (6) as medidas do defletômetro são enviadas para um computador portátil (7) através de uma porta serial.

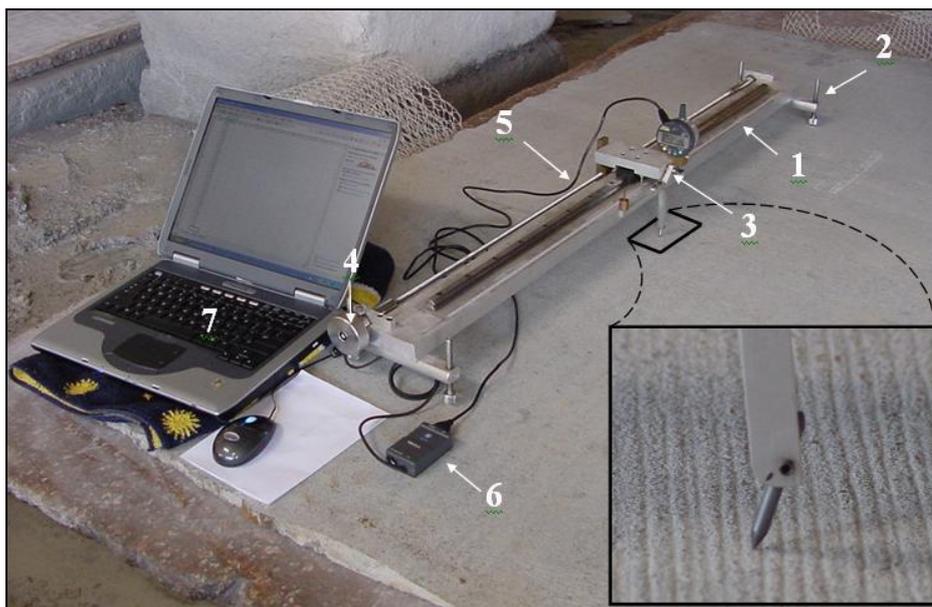


Figura 2.13 - “ARC” Avaliador de Rugosidade de Chapas e detalhe da ponta de vídea.

Assim os parâmetros obtidos podem ser plotados em gráficos que consideram a variação da “amplitude máxima da rugosidade” ( $R_t$ ) e o comprimento da superfície ensaiada ( $L$ ), conforme apresentado na Figura 2.14.

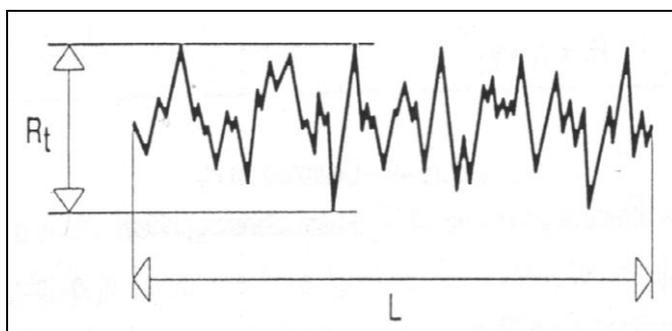


Figura 2.14 - Definição de  $R_t$  - Perfil de Rugosidade (Sandvik, 1994 apud Spínola, 1998).

Independentemente de sua natureza e processos de beneficiamento, as superfícies das placas, por mais perfeitas que sejam sempre apresentam irregularidades em relação à superfície geométrica ideal.

Para medição das irregularidades de uma superfície, existem vários métodos, dentre eles, o mais mencionado na literatura e utilizado com frequência é o chamado método *stylus*, que foi o método pioneiro na medição de imperfeições de superfícies de equipamentos mecânicos.

Existem três tipos de irregularidades, que podem ocorrer na superfície de uma placa polida interferindo no brilho final, são elas: a forma defeituosa (quando o comprimento de onda da superfície é, pelo menos, mil vezes a sua altura), a forma ondulada (quando a razão entre o comprimento de onda e a amplitude estiver entre cem e mil) e a forma rugosa (quando esta relação variar entre cinco e cem). A forma das irregularidades das superfícies é mostrada na Figura 2.15.

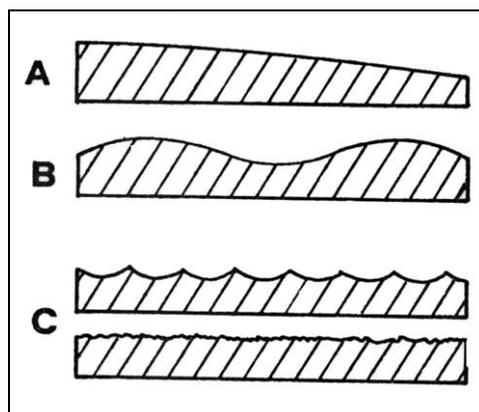


Figura 2.15 - Tipos de irregularidades de superfície: A) Forma “defeituosa”; B) Forma ondulada; C) Formas rugosas (BLASI et. al. 1995 apud RIBEIRO, 2005).

Uma placa de rocha polida menos rugosa é sinônimo de maior qualidade final, portanto, o controle da rugosidade ao longo do processo de polimento, se constitui no melhor indicador de qualidade da etapa de beneficiamento final.

- Desgaste

O desgaste é uma propriedade que as rochas possuem de resistir à remoção progressiva de constituintes de sua superfície, na qual pode ser mensurada por diminuição de volume, altura de corpo de prova e até mesmo por perda de massa (FRAZÃO, 2002).

Em muitas áreas das atividades humanas, o desgaste é um fator indesejável podendo causar perda da vida útil e do desempenho de alguns materiais utilizados no dia-a-dia. Para o polimento de rochas ornamentais, no entanto, é o desgaste da superfície ensaiada que transmite o brilho, a beleza e a durabilidade destes materiais. Portanto, é de grande importância o entendimento dos processos de atrito e desgaste envolvidos no polimento de

rochas e, a concepção de um modelo tribológico (propriedades intrínsecas da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais do processo) (SILVEIRA, 2007).

Os fatores que mais influenciam no sistema tribológico são: composição dos materiais, acabamento de superfície de cada sólido, natureza das condições de contorno, carga aplicada, velocidade relativa entre os corpos, natureza do movimento entre os corpos (unidirecional, para trás e para frente, etc.), natureza do contato, temperatura da região interfacial e as características da máquina a ser utilizada.

De acordo com Zum Gar (1987), o atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, e sim, características da relação desses materiais com as variáveis no processo operacional a que estão submetidas. O atrito é a resistência ao deslocamento e é causado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato. Já o desgaste, é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, proveniente do contato e do movimento relativo deste com outro corpo, seja sólido, líquido ou gasoso.

O desgaste por abrasão se caracteriza por movimento relativo entre um corpo duro e uma superfície “mole”. Este desgaste pode ser a dois corpos quando o abrasivo desliza ao longo de uma superfície, sendo este o caso do Polimento e a três corpos quando este desliza entre duas superfícies, como ilustra a Figura 2.16 (ZUM GAHR, 1987).

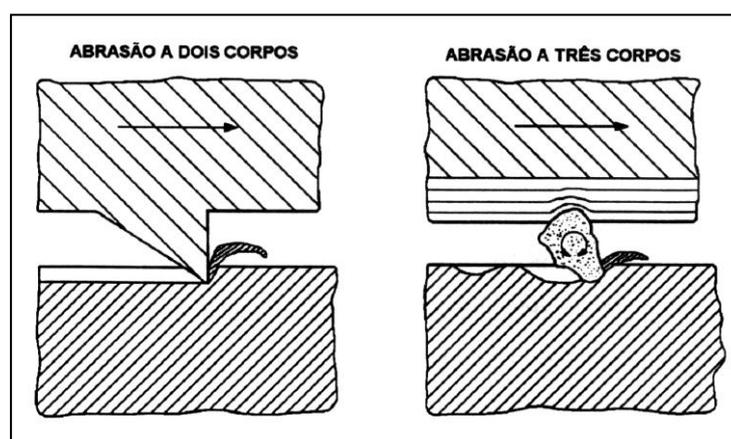


Figura 2.16 - Esquema de desgaste a dois e a três corpos (ZUM GAHR, 1987).

A resistência ao desgaste é considerada parte de um sistema tribológico, sendo influenciada por inúmeros parâmetros. Dentre estes parâmetros, podem ser citados, o tipo de abrasivo, as propriedades do material, as características do projeto e as condições operacionais do aparelho de desgaste.

## 2.7 Simulador de Polimento de Rochas

No estudo do polimento de rochas, a determinação dos parâmetros influentes na qualidade do produto final é indispensável para um verdadeiro conhecimento das interações entre as duas superfícies sólidas envolvidas, a rocha e o abrasivo (SILVEIRA, 2007).

Na tribologia, existem várias maneiras de medir a taxa de desgaste abrasivo, tanto para materiais plásticos (metais) como para materiais não-plásticos (rochas, por exemplo), onde ocorre a remoção dos elementos constituintes por trincamento (ZUM GAR, 1987).

Neste conceito, houve a necessidade de desenvolver um equipamento que representasse, de maneira mais aproximada, as condições observadas no processo industrial, o SPR – Simulador de Polimento de Rochas.

O SPR foi desenvolvido por Silveira (2007) no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP. Este equipamento é baseado nos fundamentos do ensaio de abrasão para medir o desgaste de ligas metálicas o “*pin-on-disk*”, onde uma amostra de aço com formato de pino (A) é pressionada sobre uma superfície áspera (lixa) que gira sobre um prato com movimento horizontal (B), como ilustra a Figura 2.17. Tal experimento definido pela Norma ASTM G 99-05, relaciona basicamente as variáveis: carga aplicada (F), velocidade de rotação (W), raio da circunferência (r), área de contato (d) e a granulometria do abrasivo (D).

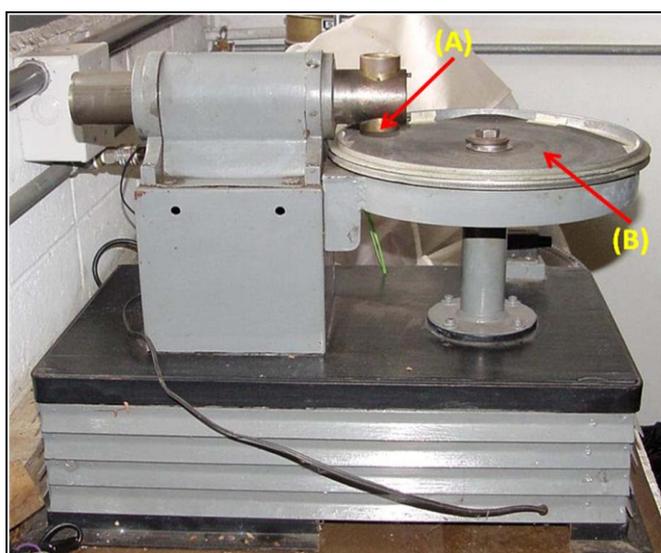


Figura 2.17 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de pin-on-disk (SILVEIRA, 2007).

No caso do SPR acontece de maneira inversa, o pino fixa o abrasivo pressionado sobre um disco de rocha que gira horizontalmente. Essa inversão de papéis foi sugerida visto que uma pequena amostra não seria representativa, impossibilitando a visualização de todos os atributos necessários (mineralogia, estrutura e textura) para a compreensão do processo de desgaste que ocorre no polimento (SILVEIRA, 2007).

Este equipamento pode ser construído a partir de uma politriz de lâmina delgada, normalmente encontrada em laboratórios de petrografia onde é adaptado um conjunto de dispositivos (torre, haste e os pesos), responsáveis por aplicar diferentes cargas no abrasivo. As Figuras 2.18a e 2.18b ilustram o equipamento “SPR – Simulador de Polimento de Rochas”.

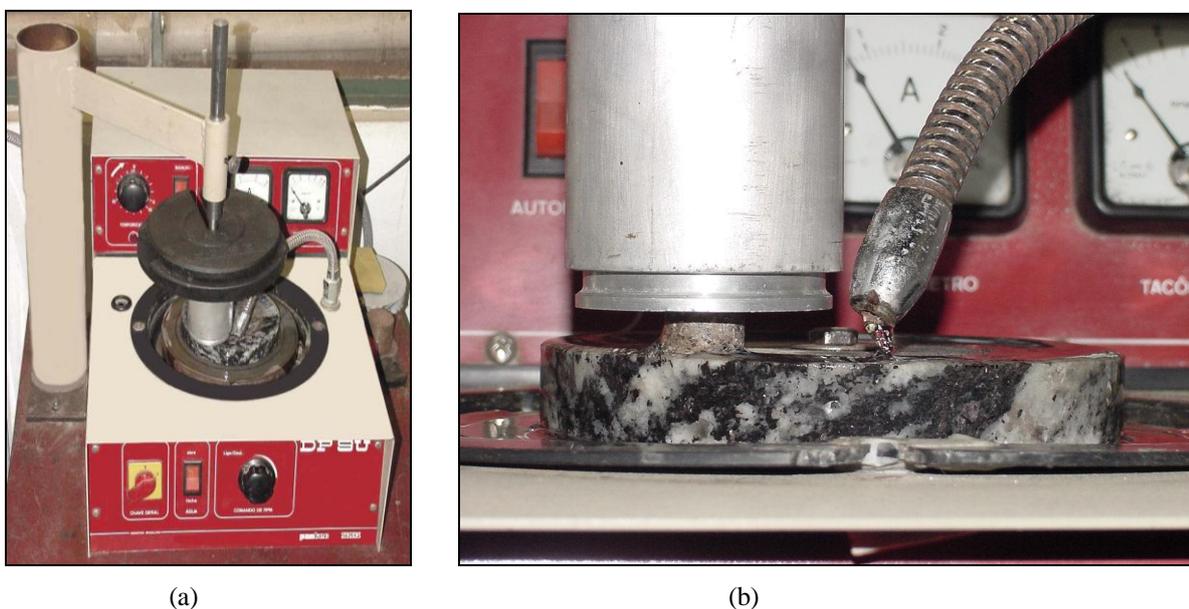


Figura 2.18 - (a) SPR – Simulador de Polimento de Rochas e (b) detalhe do disco de rocha em contato com o abrasivo (SILVEIRA, 2007).

O polimento de rochas ornamentais apresenta uma série de interações entre a rocha, os abrasivos e máquina de polir que a Indústria da Pedra ainda não considera.

Diante das informações adquiridas nesta pesquisa, teve-se a real comprovação de que o processo polimento se insere num contexto tribológico com o desgaste do tipo abrasivo a dois corpos (rebolo abrasivo e rocha), sendo o terceiro elemento formador do sistema é a máquina de polir e suas variáveis operacionais. O valor da carga, do tempo e da velocidade no polimento são variáveis que combinadas poderão eliminar etapas desse processo, gerando

assim uma redução de gastos com abrasivos, energia elétrica, tempo de produção e outros fatores que influenciarão neste processo.

O Simulador de Polimento de Rocha – SPR foi eficiente na determinação da qualidade da superfície polida em contextos operacionais distintos e vem sendo bastante utilizado para otimizar o processo de polimento industrial, assim como diminuir custos na produção, mão-de-obra, maquinário e etc.

Para determinados tipos rochosos a seqüência de abrasivos pode ser modificada com vista a agilizar o processo eliminando algumas etapas do polimento e economizar insumos, tornando assim o processo muito mais econômico, como já comprovado no por Silveira (2007).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

---

#### 3.1 Materiais Estudados

No estudo do polimento de materiais rochosos, a metodologia adotada teve como base os conceitos da Tribologia, ramo da engenharia mecânica que estuda os mecanismos de desgaste em ligas metálicas. É neste conceito que deve ser entendido o polimento de rochas como sendo um processo de desgaste de uma superfície envolvendo as três variáveis: *características da rocha, os abrasivos e as condições operacionais*.

Com o intuito identificar quais os mecanismos que influenciam na qualidade do produto final de diferentes tipos de granitos e no consumo dos abrasivos, foram escolhidos 3 tipos de rochas, classificadas no processo industrial de beneficiamento como: dura, mole e média. Foram realizados trabalhos experimentais de laboratório usando o equipamento SPR com medições de rugosidade, brilho, distância percorrida pelo abrasivo e perda de massa.

#### 3.2 Características das Rochas Estudadas

Famosas por suas excelentes propriedades funcionais e pelos atributos estéticos extremamente diferenciados, resultado da combinação de estruturas (desenhos, movimentos), texturas (dimensão e arranjo de cristais) e padrões cromáticos, as rochas brasileiras são largamente utilizada pelos engenheiros e arquitetos do mundo inteiro.

Foram selecionados três tipos litológicos, *Sienogranito* (Vermelho Brasília), *Monzogranito* (Cinza Andorinha) e *Migmatito* (Jacarandá Rosado). A escolha teve como base a grande aceitação comercial, os diferentes aspectos estruturais e texturais e o largo emprego como revestimentos de pisos e paredes de edificações.

As características petrográficas apresentadas a seguir foram cedidas pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro (IGCE) - UNESP.

a) O  ***sienogranito Vermelho Brasília***  de natureza magmática é extraído no município de Jaupací, Estado de Goiás Figura 3.1. Possui uma coloração avermelhada com estrutura discretamente orientada, inequigranular, de granulação grossa. A granulação oscila desde 0,3 mm até cerca de 5,0 cm ou mais, com predominância entre 0,5 e 3,0 cm, caracterizada por bom entrelaçamento mineral. Os cristais maiores são de microclínio, os quais exibem formas variadas, podendo ser irregulares, alongados ou ovalados (com dimensões que podem atingir até 2,5 x 5,0 cm) a prismáticos (nestes casos apresentam dimensões que vão desde 0,5 x 0,5 x 1,5cm a 1,5 x 2,0 x 5,0cm). Apresentam contornos irregulares (devido à corrosão durante cristalização magmática) e mais raramente retilíneos (situação mais freqüente nos cristais prismáticos), o que, apesar da granulação grossa da rocha, se reflete em bom imbricamento mineral e conseqüentemente na coesão da rocha.

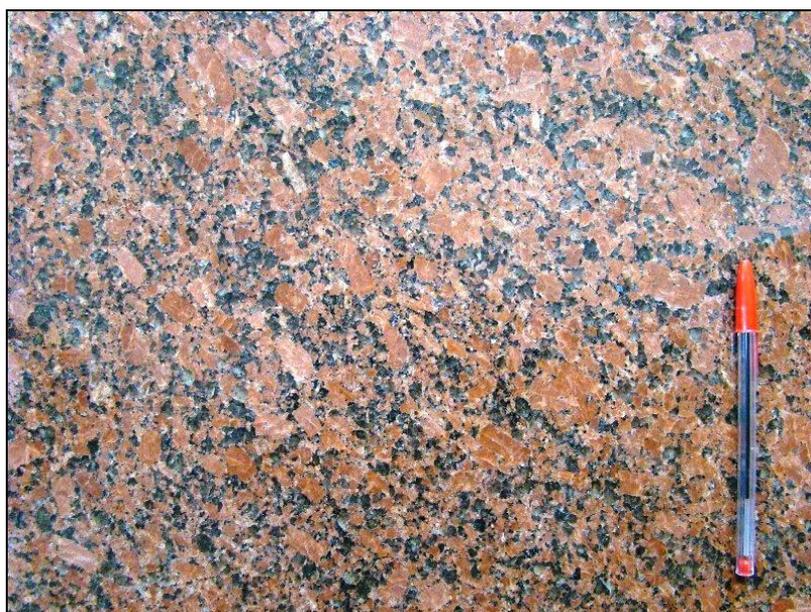


Figura 3.1 - *Sienogranito Vermelho Brasília*

Apresenta uma estrutura de discreta orientação de fluxo, evidenciada basicamente por grosseira orientação preferencial dos cristais alongados de microclínio.

Microscopicamente exhibe textura fanerítica média a grossa, inequigranular, hipidiomórfica. A granulação média oscila entre 0,5 a 1,5cm, sendo que o microclínio representa os cristais com as maiores dimensões. Os contatos minerais variam de interlobados

(côncavo/convexos) a parcialmente retilíneos, refletindo, no geral, em bom entrelaçamento mineral. Registra-se que os contatos entre os agregados monominerálicos de quartzo e os cristais de feldspatos são irregulares, e que internamente aos referidos agregados os cristais de quartzo exibem entre si contatos preferencialmente retilíneos a levemente lobulados. Já os cristais de microclínio e de plagioclásio exibem contornos externos côncavo/convexos a irregulares, devido a freqüentes feições de corrosão magmática, o que contribui para o melhor imbricamento global da rocha.

Baixo microfissuramento, predominantemente intergranular, preferencialmente nos cristais de quartzo. As microfissuras mostram-se tanto fechadas quanto abertas, nestes casos, preenchidas por minerais opacos, sericita e algum epidoto.

Fraca a moderada alteração mineral caracterizada por visível argilomineralização dos cristais de feldspatos, manifestando-se sob forma de manchas pulverulentas, de coloração acastanhada devido ao efeito da pigmentação por óxidos e hidróxidos de ferro. Os cristais de plagioclásio são os mais afetados, principalmente em seus núcleos, além de exibirem discreto efeito de sericitização. Já nos cristais de microclínio, apesar de menos afetados, a argilomineralização distribui-se homogêaneamente por toda a extensão de sua superfície. Os cristais maiores de biotita encontram-se praticamente inalterados, por vezes com discreta cloritização em bordas com texturas simplicíticas, além de conterem algumas micro-inclusões lineares de agregados de opacos disseminados dispostos ao longo dos planos de clivagem. Na Tabela 3.1 segue a descrição microscópica:

Tabela 3.1 - Composição Mineralógica do *Sienogranito* Vermelho Brasília

<i>Composição Mineralógica</i>	<i>(% modal)</i>
Quartzo	32,00
Feldspato Potássico (Microclínio)	41,00
Plagioclásio (Oligoclásio)	16,00
Biotita	5,0
Acessórios*	2,0
Minerais Secundários**	4,0

\* Acessórios: opacos, apatita, zircão e granada.

\*\* Minerais Secundários: sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonatos, argilo-minerais, hidróxidos de ferro.

## Caracterização Tecnológica – Vermelho Brasília

Massa Específica: 2621 kg/m<sup>3</sup>

Porosidade: 0,69%

Absorção D'água: 0,26%

Resistência à Compressão Simples: 209,89 MPA

Resistência ao Desgaste “Amsler”: 0,51 mm

Coefficiente de Dilatação Térmica:  $5,7 \cdot 10^{-3}$  mm/m°C.

**b) O *monzogranito Cinza Andorinha***, também de natureza magmática é lavrado na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, Estado do Espírito Santo (Figura 3.2). Considerada uma rocha granítica de coloração cinza claro, com estrutura isotrópica e textura fanerítica equigranular, hipidiomórfica, de granulação média a média/fina, oscilando entre 0,5 a 5,0 mm, com predominância de cristais com dimensões de 1,0 a 2,0 mm.



Figura 3.2 - *Monzogranito Cinza Andorinha*

O seu microfissuramento é moderado, ocorrendo predominantemente microfissuras intragrãos, na maioria das vezes preenchidas por sericita e carbonato. Apresenta baixa intercomunicabilidade, ocorrendo mais freqüentemente nos cristais de quartzo.

Exibe grau alteração incipiente a moderado, principalmente devida à saussuritização (formação de sericita, epidoto, carbonatos e argilominerais) associada aos cristais de plagioclásio e, mais discretamente, pela cloritização da biotita. A alteração do plagioclásio processa-se tanto sob forma disseminada quanto concentrada nas partes centrais dos cristais. Sua descrição microscópica segue abaixo na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição Mineralógica do *Monzogranito* Cinza Andorinha

<i>Composição Mineralógica</i>	<i>(% modal)</i>
Quartzo	30,00
Feldspato Potássico (Microclínio)	31,00
Plagioclásio	25,00
Biotita	12,0
Acessórios*	2,0
Minerais Secundários**	--

\* Acessórios: opacos, Titanita, zircão, apatita, Allanita.

\*\*Minerais Secundários: sericita, epidoto, clorita, argilominerais, carbonatos.

### **Caracterização Tecnológica – Cinza Andorinha**

Massa Específica: 2703 kg/m<sup>3</sup>

Porosidade: 1,01%

Absorção D'água: 0,38%

Resistência à Compressão Simples: 151,5 MPA

Resistência ao Desgaste “Amsler”: 0,63 mm

Coefficiente de Dilatação Térmica: 7,1 10<sup>-3</sup> mm/m°C.

b) O *migmatito sienogranítico Jacarandá Rosado* de natureza metamórfica é encontrado no município de Extrema, Estado de Minas Gerais (Figura 3.3). Exibe uma coloração rósea acastanhada a acinzentada contendo esparsas pontuações pretas e padrão estético variável, entre o homogêneo e o movimentado (fantasia), definido por típica estrutura migmatítica nebulítica. Este migmatito apresenta grandes variações estruturais e texturais, como é típico nesse tipo de rocha. Em geral há predomínio da estrutura nebulítica, sendo possível o reconhecimento de foliação com planos espaçados, localmente perturbados por dobras, que definem as estruturas migmatíticas do tipo dobrada a flebítica.

A textura é fanerítica, inequigranular com granulação predominantemente média, com gradações localizadas para termos com granulação fina ou para média-grossa. Os contatos minerais são variados, predominando os tipos côncavo-convexos e lobulados, que por vezes tende a contatos planos, ocorrendo localmente minerais com contatos serrilhados.

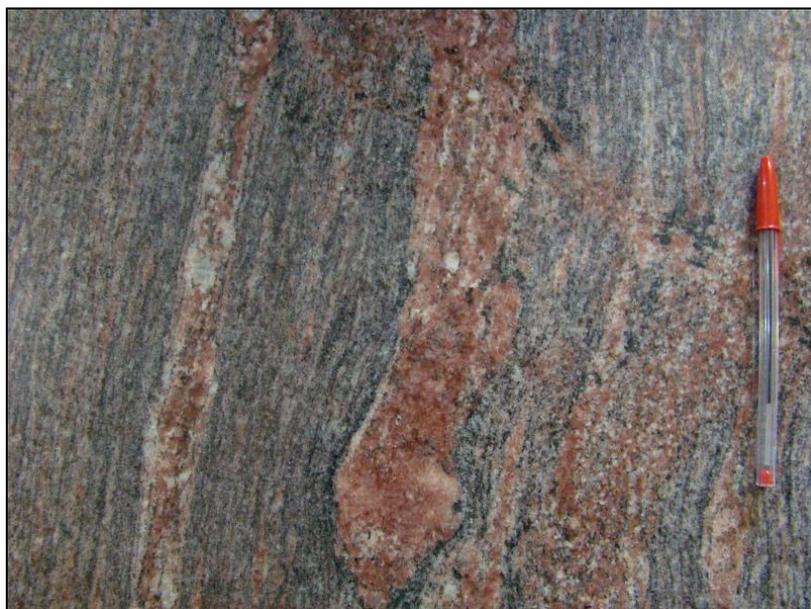


Figura 3.3 - *Migmatito Sienogranítico Jacarandá Rosado*

O microfissuramento moderado a intenso afeta de maneira semelhante todas as espécies minerais e é definido por planos intragrão com e sem comunicação. Fraturas intragranulares são planos pouco extensos que afetam dois ou três cristais, embora não raras. O preenchimento por minerais secundários é comum. O grau de alteração varia de fraco a moderado, sendo ligeiramente mais intenso no plagioclásio que no feldspato. Sua descrição microscópica é ilustrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição Mineralógica do *Migmatito Sienogranítico* Jacarandá Rosado.

<i>Composição Mineralógica</i>	<i>(% modal)</i>
Quartzo	30,50
Feldspato Potássico (Microclínio)	38,50
Plagioclásio	22,00
Biotita	8,6
Acessórios*	0,4
Minerais Secundários**	--

\* Acessórios: opacos, granada, zircão, titanita e apatita.

\*\* Minerais Secundários: sericita, epidoto, argilominerais e carbonatos.

### **Caracterização Tecnológica – Jacarandá Rosado**

Massa Específica: 2653 kg/m<sup>3</sup>

Porosidade: 0,65%

Absorção D'água: 0,26%

Resistência à Compressão Simples: 156,4 MPA

Resistência ao Desgaste “Amsler”: 0,55 mm

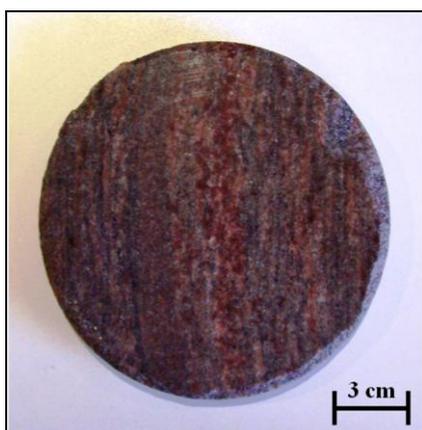
Coefficiente de Dilatação Térmica: 5,41 10<sup>-3</sup> mm/m°C.

#### **3.2.1 Preparação dos corpos de prova**

Foram extraídos de ladrilhos comerciais de 40 x 40 cm e espessura de 2,0 cm, utilizando uma coroa diamantada de diâmetro de 15 cm, como mostra a Figura 3.4. Depois de retirados foi feito um furo central (Figura 3.5a) com torno mecânico (Figura 3.5b) para permitir sua fixação no prato giratório no Simulador de Polimento de Rochas – SPR.



Figura 3.4 – Extração do corpo-de-prova com coroa diamantada de  $\text{Ø}15\text{cm}$ .



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) corpo-de-prova (face polida) e (b) Torno mecânico

### 3.3 Abrasivos

O abrasivo utilizado nos ensaios de polimento foi o Magnesiano, composto por carbeto de silício (SiC) como elemento abrasivo e óxido de magnésio como material ligante. Para a sua escolha, foram levados em consideração três fatores: menor preço, R\$ 8,00, a unidade do rebolo contra R\$ 75,00 do resinóide; freqüente emprego nas grandes e pequenas marmorarias e fácil manuseio não necessitando de mão-de-obra especializada.

A seqüência abrasiva escolhida foi: 24#, 36#, 60#, 120#, 220#, 400#, 600#, 800#, 1200# e lustro (Figura 3.6). Tal seqüência usada em estudos anteriores sobre polimento e também por ser a mais utilizada na Indústria, com o objetivo de buscar as melhores condições operacionais e o melhor resultado de brilho dos materiais rochosos estudados.

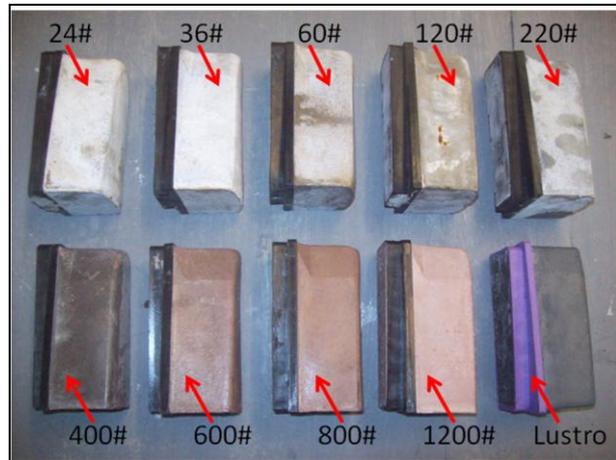


Figura 3.6 - Seqüência dos rebolos abrasivos magnesianos (COBRAL) utilizados na indústria.

### 3.3.1 Preparação do abrasivo

Nos ensaios de polimento foram utilizados corpos-de-prova dos abrasivos (cilíndricos) com diâmetro de 1,7 cm, extraídos com coroa diamantada dos próprios rebolos abrasivos utilizados na indústria (Figuras 3.7a e 3.7b).

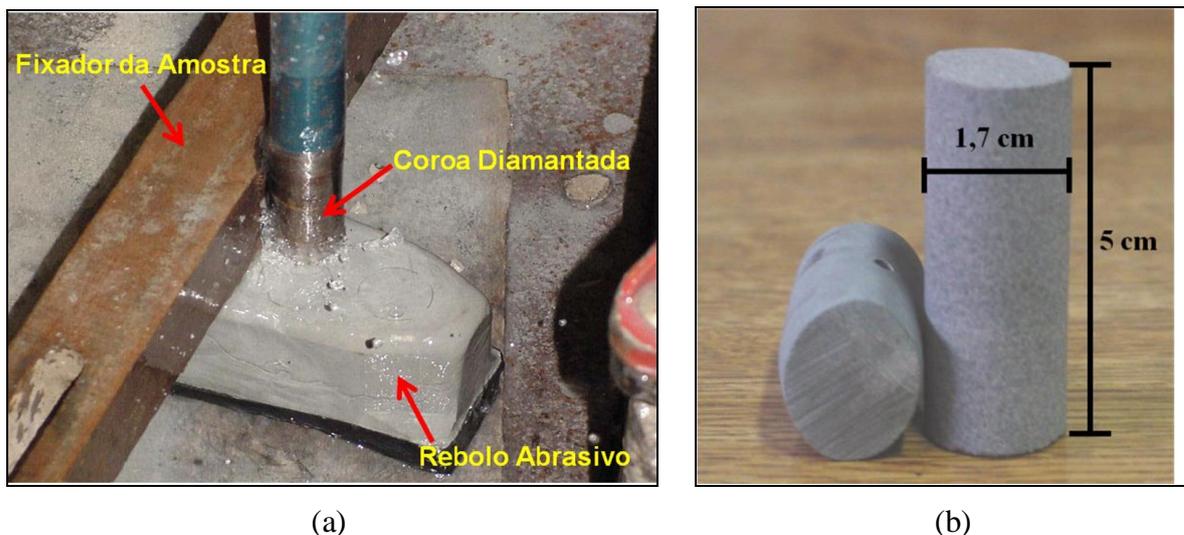


Figura 3.7 – (a) extração de corpo-de-prova do rebolo abrasivo e (b) corpo-de-prova extraído

### 3.4 Condições Operacionais

De acordo com a metodologia que foi adotada nas rochas para revestimento, baseada no conceito de tribossistema, os elementos que o compõe não podem ser analisados isoladamente, porque se perderia a noção de um sistema integrado, de interdependência entre as variáveis.

Para se obter maior precisão no conjunto das medidas, foram feitas algumas modificações e adaptações nos equipamentos usados nos três experimentos: SPR (Simulador de Polimento de Rochas), ARC (Avaliador de Rugosidade de Chapas) e o *Glossmeter*.

- SPR (Simulador de Polimento de Rochas)

Para aumentar sua eficiência, praticidade e exatidão e ao mesmo tempo diminuir as vibrações existentes, foi reduzida a altura da torre (A), invertida a localização dos pesos e a mudança da forma de discos (B) para cilindro (C), conforme ilustrados nas Figuras 3.8a e 3.8b.

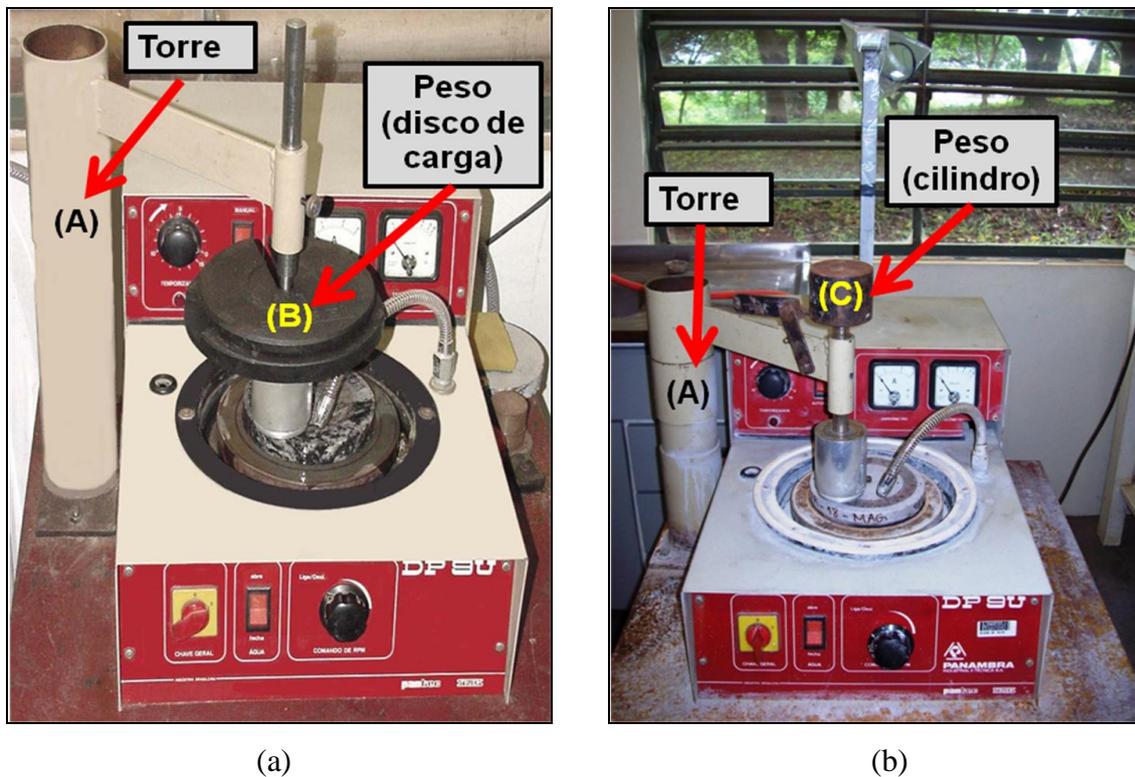


Figura 3.8 - SPR – (a) antes e (b) depois das modificações.

- ARC (Avaliador de Rugosidade de Chapas)

Para um maior detalhamento do perfil de rugosidade, o equipamento ARC sofreu algumas adaptações mostradas nas Figuras 3.9a e 3.9b, sendo elas: a) aumento da precisão das leituras verticais de 0,25mm para 0,0625mm em intervalos horizontais de 1,25mm; b) troca da ponta de vídea por agulha de aço modelo “Orange N° 28” usada em máquina de costura; c) mudança do sistema de braço do tipo “alavanca” para uma haste que fica em contato direto com o defletômetro.

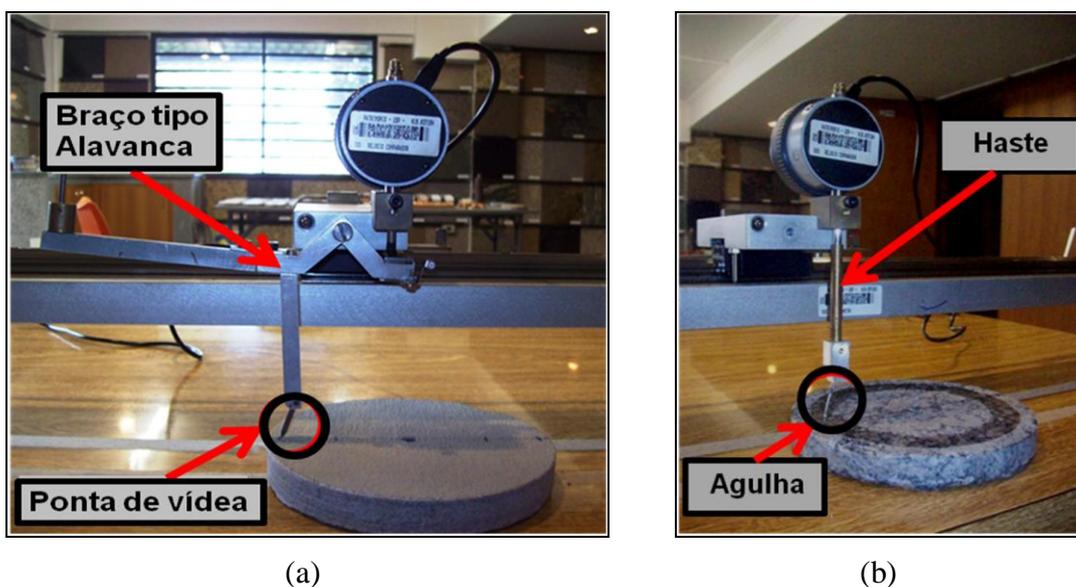


Figura 3.9 – Medição da rugosidade nos corpos de prova: (a) rugosímetro para placas de rochas e (b) rugosímetro adaptado para o estudo.

- *Glossmeter*

Nas amostras submetidas ao processo de polimento, foi feita a medição do brilho com o auxílio do *Glossmeter* (Figura 3.10a), com o objetivo de obter uma informação indireta da qualidade da superfície polida. Para restringir o campo de leitura do brilho nas amostras ensaiadas, foi necessária a adaptação de uma placa de metal com abertura elíptica (Figura 3.10 b), para que o feixe de luz se restringisse somente ao sulco polido.

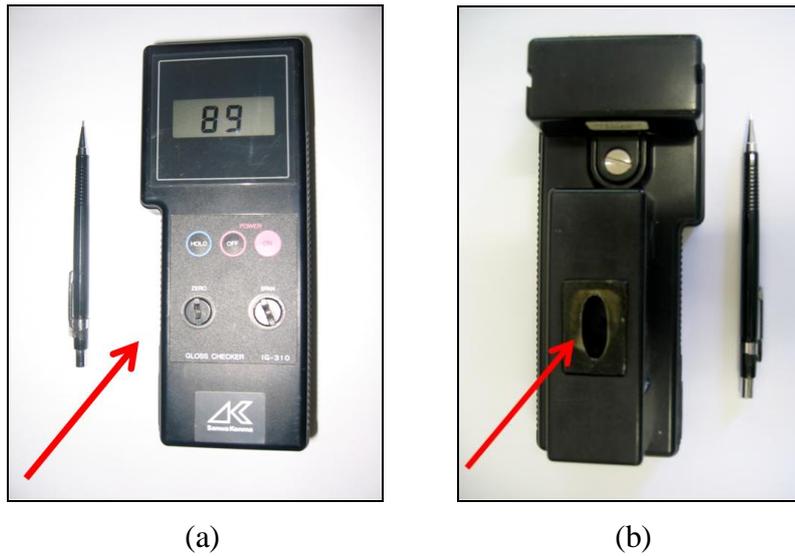


Figura 3.10 - *Glossmeter*: (a) vista frontal e (b) placa de metal com a abertura elíptica adaptada.

As medidas de brilho foram realizadas em 6 intervalos (Figura 3.11) durante as trocas de abrasivos, esses valores foram somados e tirada a média, que permitiu acompanhar a variação dos valores desta propriedade em cada etapa do processo de polimento e analisar o comportamento dos minerais presentes.

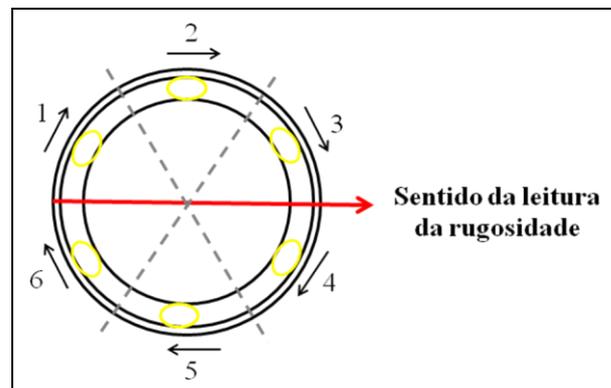


Figura 3.11 - Disposição das áreas de leitura do brilho das amostras ensaiadas.

#### 3.4.1 Procedimento do ensaio

As amostras foram pesadas numa balança com capacidade de até 1.300g e precisão de 0,01g, em seguida medida a rugosidade inicial nos dois trechos (A e B) sobre a referência horizontal, como ilustra a Figura 3.12.

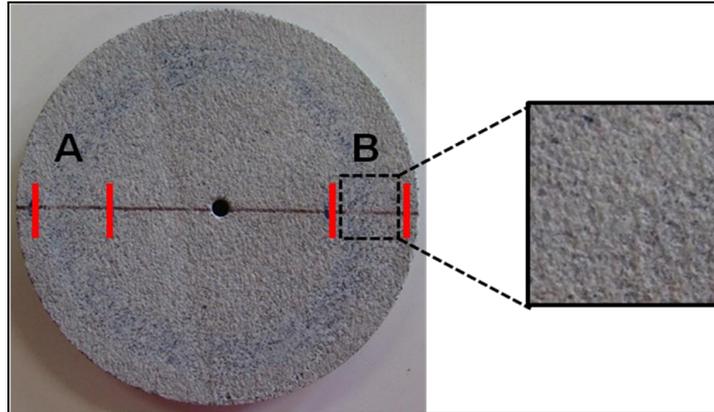


Figura 3.12 - Trechos “A” e “B” onde são medidas as rugosidades ( $R_t$ ) e no detalhe as estrias de rugosidade inicial.

Conhecidas as massas iniciais e a rugosidade ( $R_t$ ), o corpo de prova é fixado sobre o prato giratório (1), por meio de um parafuso central (2) e colocado o peso (3) sobre o pino abrasivo (4), sendo, em seguida, aberta a torneira de água (5) e ligado motor, dando-se início ao processo de polimento com a primeira etapa abrasiva (24#), como ilustra a Figura 3.13.

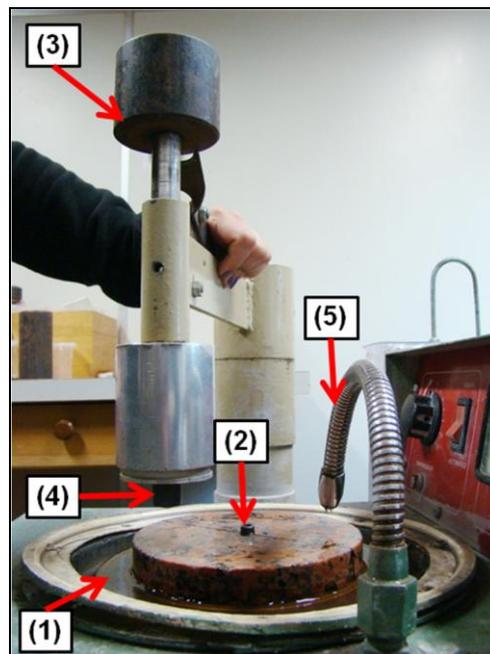


Figura 3.13 - Detalhe do aparelho SPR. (1) Prato giratório, (2) Parafuso central, (3) Peso, (4) Pino Abrasivo e (5) Torneira de água.

Na Tabela 3.4 são mostradas as etapas de ensaios no Simulador de Polimento de Rocha “SPR” levando em consideração os três tipos de rochas estudadas, bem como as condições de ensaio (Tempo, Carga e Velocidade), totalizando 9 combinações por tipo de rocha passando pelas 10 etapas abrasivas (24# ao lustro).

Tabela 3.4 - Combinações do ensaio de polimento das amostras utilizando o Simulador de Polimento de Rocha (SPR).

AMOSTRAS			Combinações	Tempo (min)	Carga (bar)	Velocidade (rpm)
VB	CA	JR	1	2	1	200
VB	CA	JR	2	2	1	400
VB	CA	JR	3	2	1	600
VB	CA	JR	4	4	1	200
VB	CA	JR	5	4	1	400
VB	CA	JR	6	4	1	600
VB	CA	JR	7	6	1	200
VB	CA	JR	8	6	1	400
VB	CA	JR	9	6	1	600

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

Terminado o ensaio no SPR (primeira combinação: 2 min, 1 bar, 200 rpm), as amostras são lavadas para remoção dos insumos abrasivos e os resíduos gerados, submetidas à secagem em estufa (100°C), medido o brilho (em 6 trechos), feito o registro fotográfico e novamente pesadas para dar início à próxima etapa abrasiva (36#). Portanto, cada combinação passará pelas 10 etapas abrasivas, resultando assim em 270 ensaios para as três rochas estudadas.

## 4 RESULTADOS

---

De todas as rochas estudadas serão apresentados os perfis de rugosidade inicial, os gráficos de perda de massa e brilho alcançados no final de cada etapa abrasiva.

### 4.1 Rugosidade Inicial

Em todos os corpos-de-prova, as leituras de rugosidade ( $R_t$ ) foram realizadas nos dois trechos (A e B), onde o espaço percorrido corresponde a 3,0 cm. As medidas foram feitas com o “ARC” (apresentado no capítulo 3) em cada trecho, em intervalos de 0,0625mm, totalizando assim, 480 medições (Figura 4.1). Na abscissa foram colocadas as medidas do caminhamento em milímetro e na ordenada os valores de pico e vale com precisão de microns.

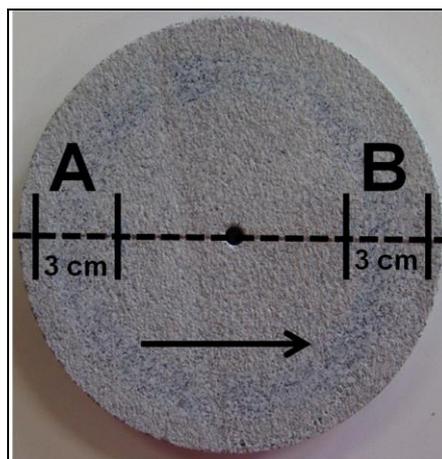


Figura 4.1 - Espaços percorridos pelo rugosímetro (A e B) no sentido indicado pela seta.

Foram escolhidas 3 amostras de cada tipo litológico para determinação das condições de rugosidade iniciais e análises da variação dos perfis nos trechos já estabelecidos anteriormente, como mostram as figuras a seguir:

• VERMELHO BRASÍLIA

São apresentados os perfis de rugosidade iniciais dos dois trechos (A e B) das 3 amostras do “granito” Vermelho Brasília e seus respectivos parâmetros Rt, antes de iniciar a primeira etapa do polimento. Os valores de Rt foram: 463 $\mu$ m e 461 $\mu$ m (comb. 1), 340 $\mu$ m e 323 $\mu$ m (comb. 2) e 323 $\mu$ m e 255 $\mu$ m (comb. 3) respectivamente ilustrados na Figura 4.2.

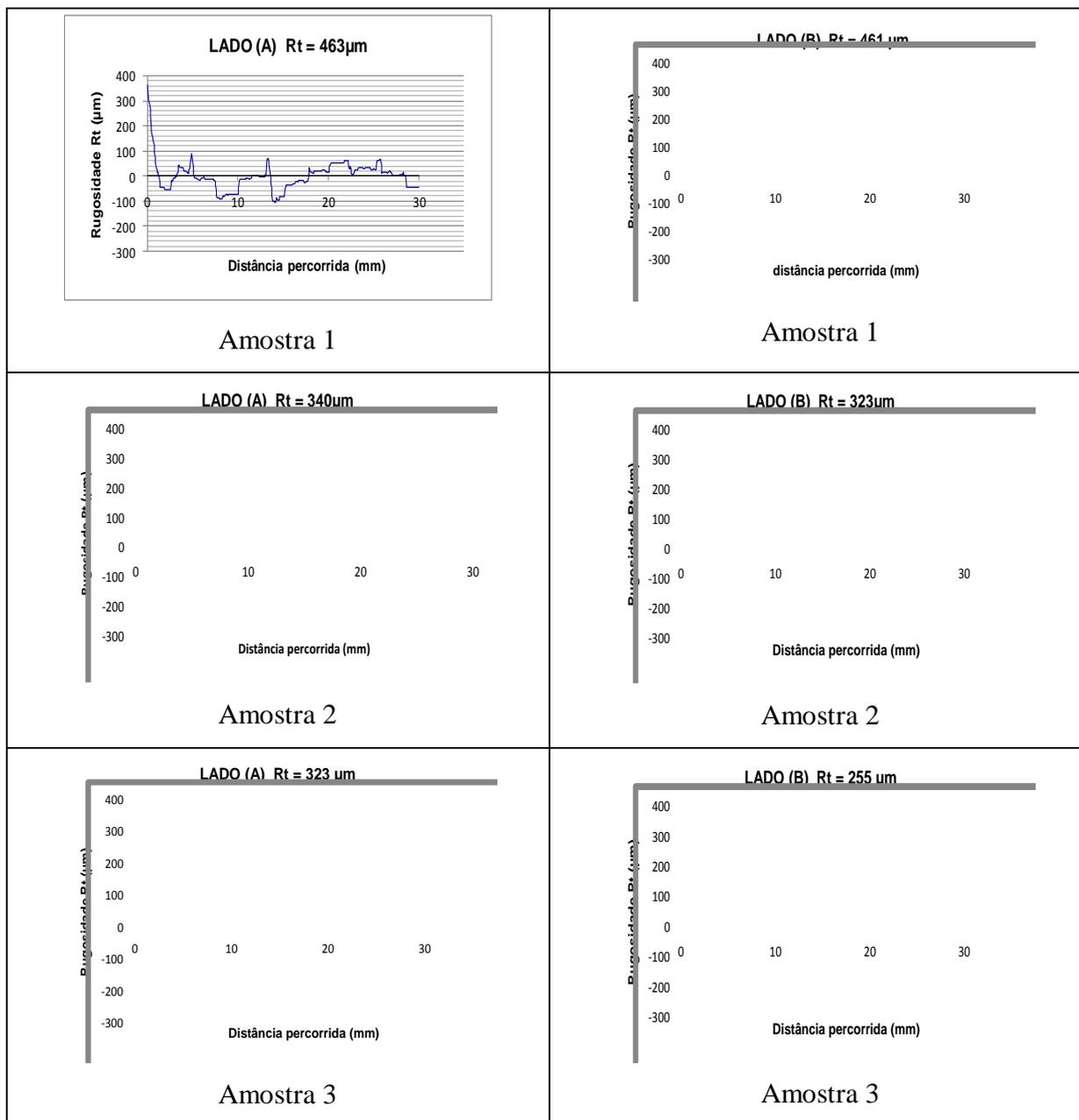


Figura 4.2 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Vermelho Brasília

- CINZA ANDORINHA

São apresentados os perfis de rugosidade iniciais dos dois trechos (A e B) das 3 amostras do “granito” Cinza Andorinha e seus respectivos parâmetros Rt, antes de iniciar a primeira etapa do polimento. Os valores de Rt foram: 364 $\mu$ m e 394 $\mu$ m (comb. 1), 356 $\mu$ m e 318 $\mu$ m (comb. 2) e 253 $\mu$ m e 311 $\mu$ m (comb. 3) respectivamente ilustrados na Figura 4.3.

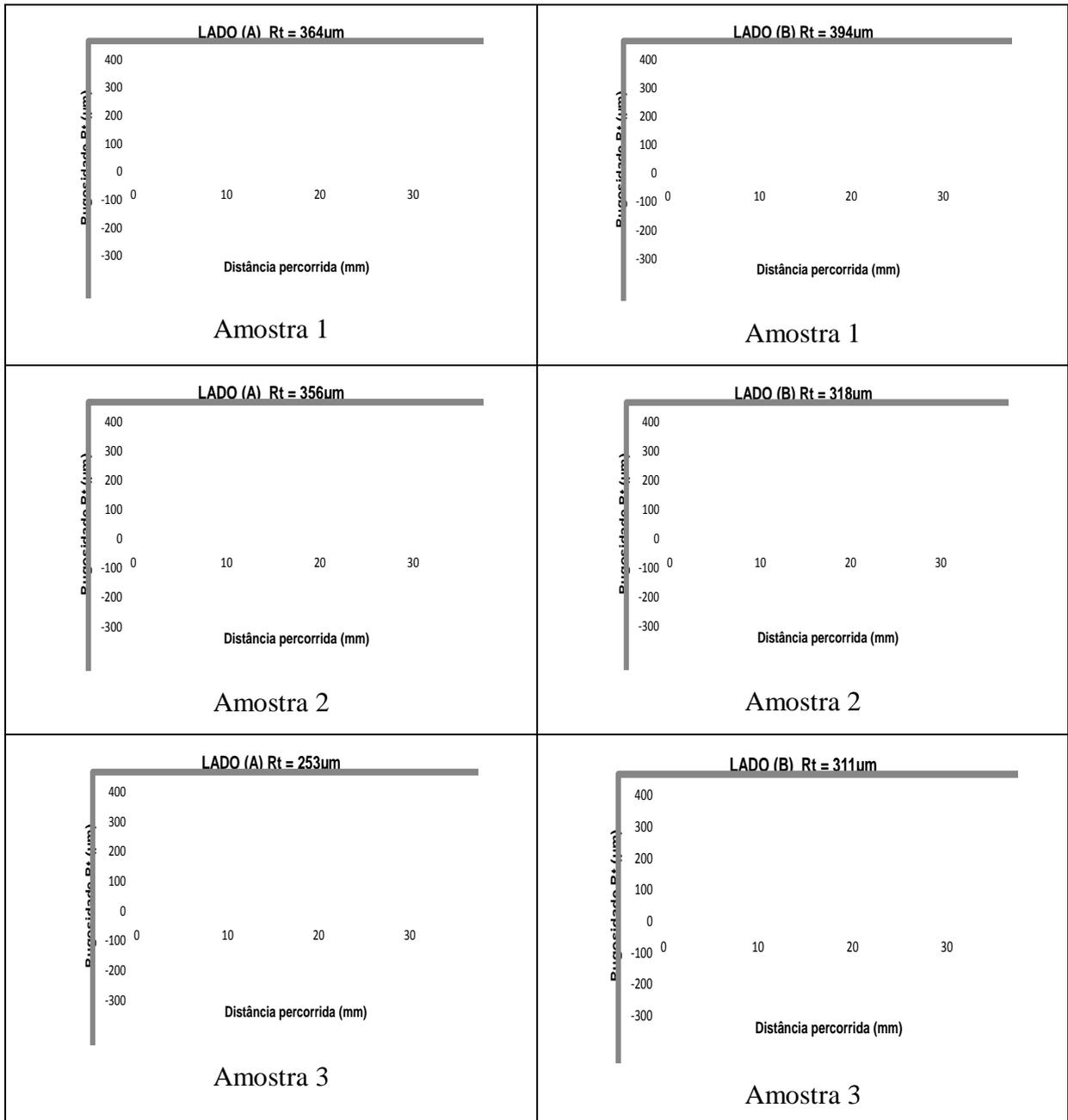


Figura 4.3 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Cinza Andorinha

• JACARANDÁ ROSADO

São apresentados os perfis de rugosidade iniciais dos dois trechos (A e B) das 3 amostras do “granito” Jacarandá Rosado e seus respectivos parâmetros  $R_t$ , antes de iniciar a primeira etapa do polimento. Os valores de  $R_t$  foram: 298 $\mu\text{m}$  e 356 $\mu\text{m}$  (comb. 1), 241 $\mu\text{m}$  e 390 $\mu\text{m}$  (comb. 2) e 291 $\mu\text{m}$  e 376 $\mu\text{m}$  (comb. 3) respectivamente ilustrados na Figura 4.4.

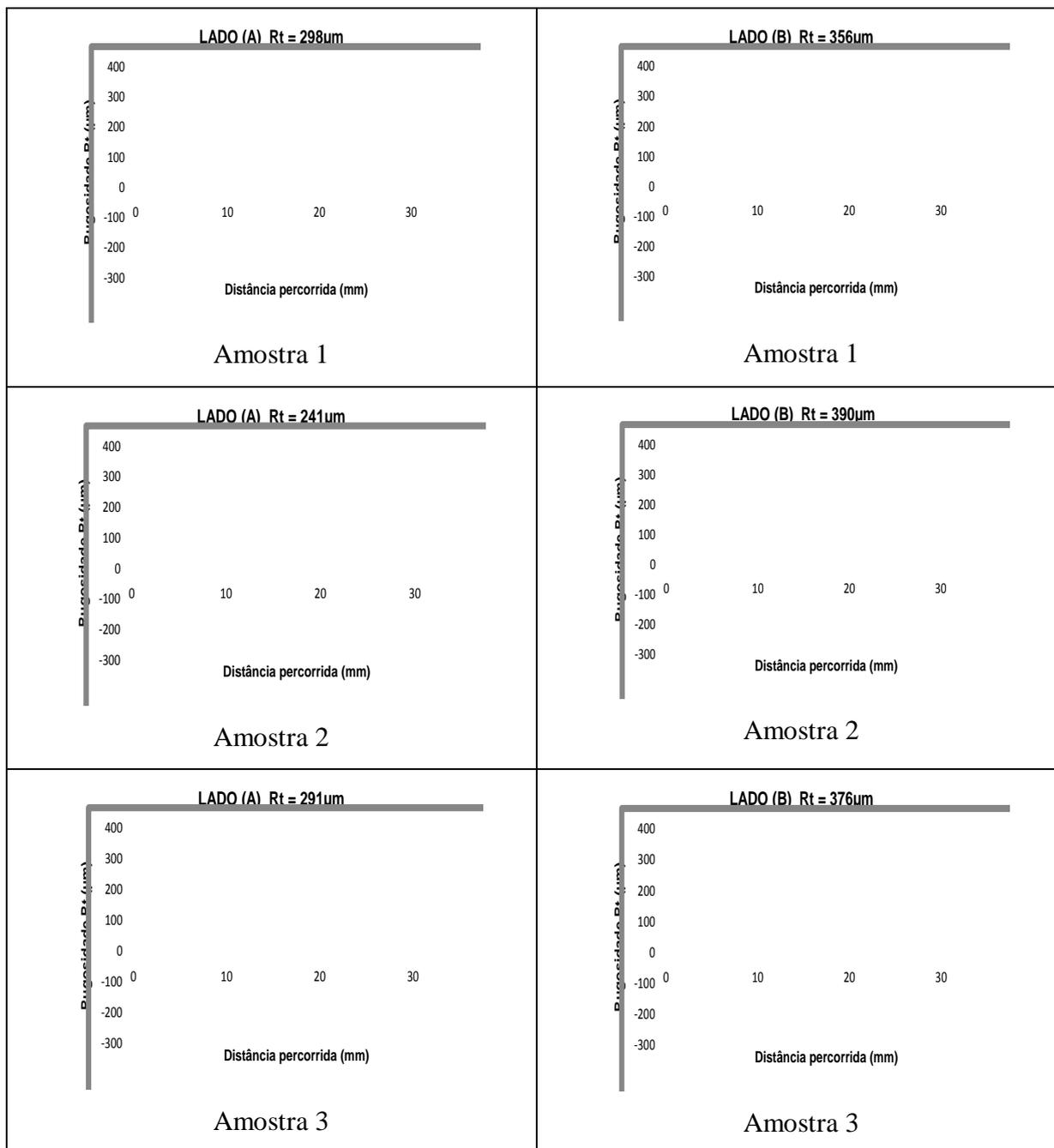


Figura 4.4 - Gráficos dos perfis de rugosidades iniciais do “granito” Jacarandá

## 4.2 Perda de Massa

As 9 combinações, do processo de polimento do Vermelho Brasília, Cinza Andorinha e Jacarandá Rosado, serão apresentadas nas formas de tabelas e gráficos. Nas Tabelas de 4.1 à 4.9 são mostradas as massas dos corpos-de-prova e suas respectivas perdas em porcentagem e nas Figuras de 4.5 à 4.13 o comportamento de cada uma delas quando comparadas entre si.

Tabela 4.1 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 1ª combinação (2min; 1bar; 200rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	1009,02	0	935,41	0	986,52	0
24#	1008,55	0,05	935,07	0,04	986,36	0,02
36#	1008,34	0,07	934,49	0,1	986,01	0,05
60#	1007,90	0,11	934,21	0,13	985,79	0,07
120#	1007,60	0,14	933,72	0,18	985,49	0,11
220#	1007,39	0,16	933,58	0,2	985,40	0,11
400#	1007,21	0,18	933,30	0,23	985,28	0,13
600#	1007,11	0,19	933,22	0,23	985,26	0,13
800#	1007,07	0,19	932,96	0,26	985,11	0,14
1200#	1007,05	0,2	932,93	0,26	985,09	0,14
Lustro	1006,96	0,21	932,81	0,28	985,00	0,15
<b>TOTAL</b>	<b>2,06</b>	<b>1,5</b>	<b>2,6</b>	<b>1,91</b>	<b>1,52</b>	<b>1,05</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

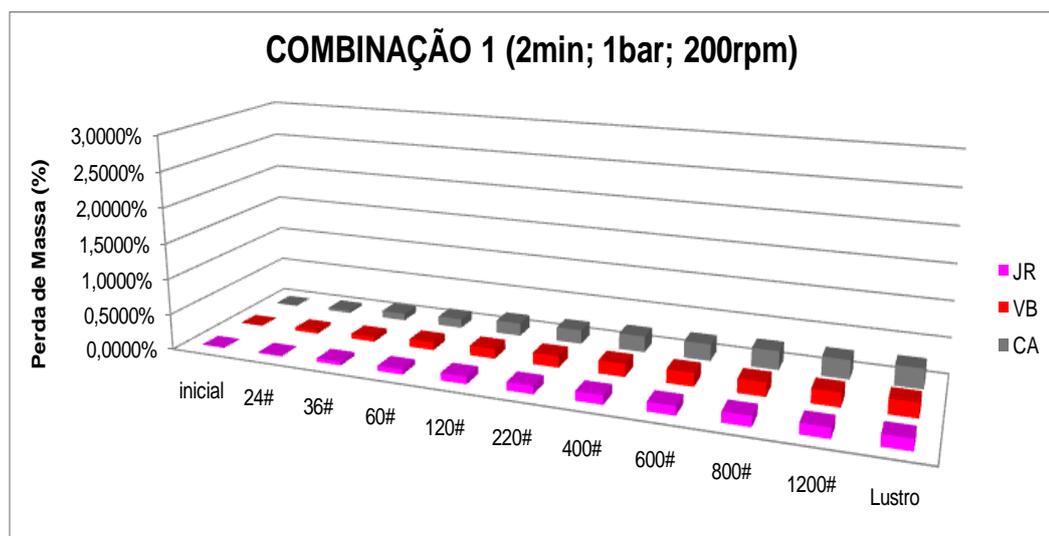


Figura 4.5 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 1ª combinação.

Tabela 4.2 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 2ª Combinação (2min; 1bar; 400rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	977,13	0	974,00	0	986,27	0
24#	975,98	0,12	972,31	0,17	985,14	0,11
36#	975,39	0,18	971,38	0,27	984,50	0,18
60#	974,86	0,23	970,77	0,33	983,95	0,24
120#	974,25	0,29	969,98	0,41	983,41	0,29
220#	973,95	0,33	969,43	0,47	982,96	0,34
400#	973,79	0,34	969,03	0,51	982,83	0,35
600#	973,68	0,35	968,92	0,52	982,71	0,36
800#	973,64	0,36	968,88	0,53	982,67	0,36
1200#	973,60	0,36	968,81	0,53	982,64	0,37
Lustro	973,40	0,38	968,65	0,55	982,49	0,38
<b>TOTAL</b>	<b>3,73</b>	<b>2,94</b>	<b>5,35</b>	<b>4,29</b>	<b>3,78</b>	<b>2,98</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

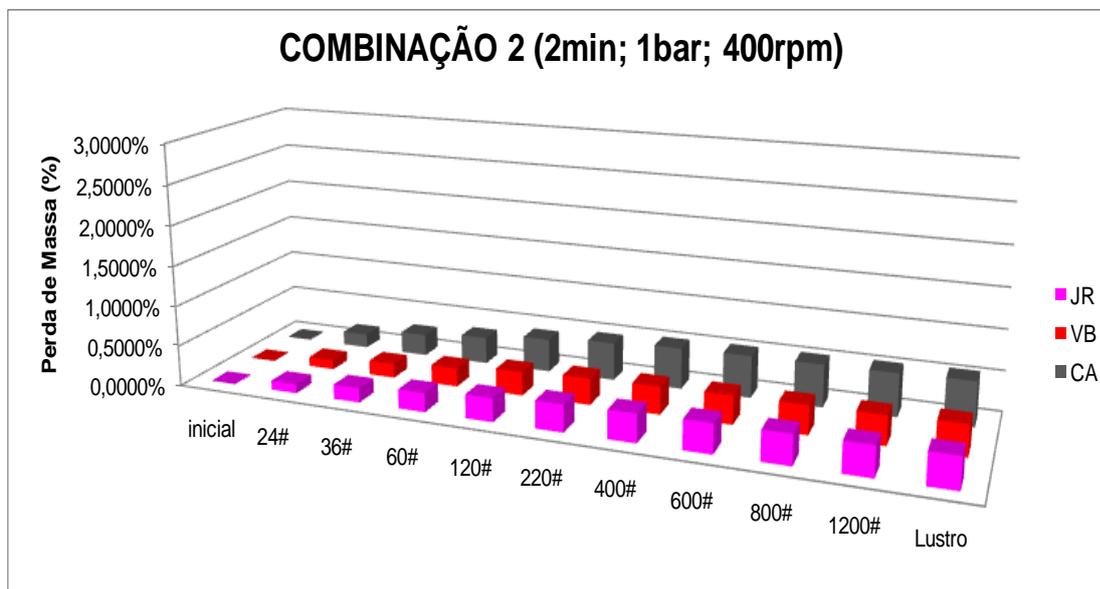


Figura 4.6 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 2ª combinação.

Tabela 4.3 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 3ª Etapa do processo (2min; 1bar; 600rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	983,50	0	957,45	0	986,03	0
24#	982,26	0,13	955,35	0,22	984,91	0,11
36#	981,66	0,19	953,68	0,39	984,16	0,19
60#	980,97	0,26	952,32	0,54	983,94	0,21
120#	980,26	0,33	951,08	0,66	983,27	0,28
220#	980,01	0,35	950,50	0,73	983,09	0,29
400#	979,89	0,37	950,12	0,76	982,92	0,32
600#	979,86	0,37	950,12	0,76	982,87	0,32
800#	979,67	0,39	949,92	0,79	982,67	0,34
1200#	979,65	0,39	949,89	0,79	982,64	0,34
Lustro	979,63	0,39	949,88	0,79	982,62	0,35
<b>TOTAL</b>	<b>3,87</b>	<b>3,17</b>	<b>7,57</b>	<b>6,43</b>	<b>3,41</b>	<b>2,75</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

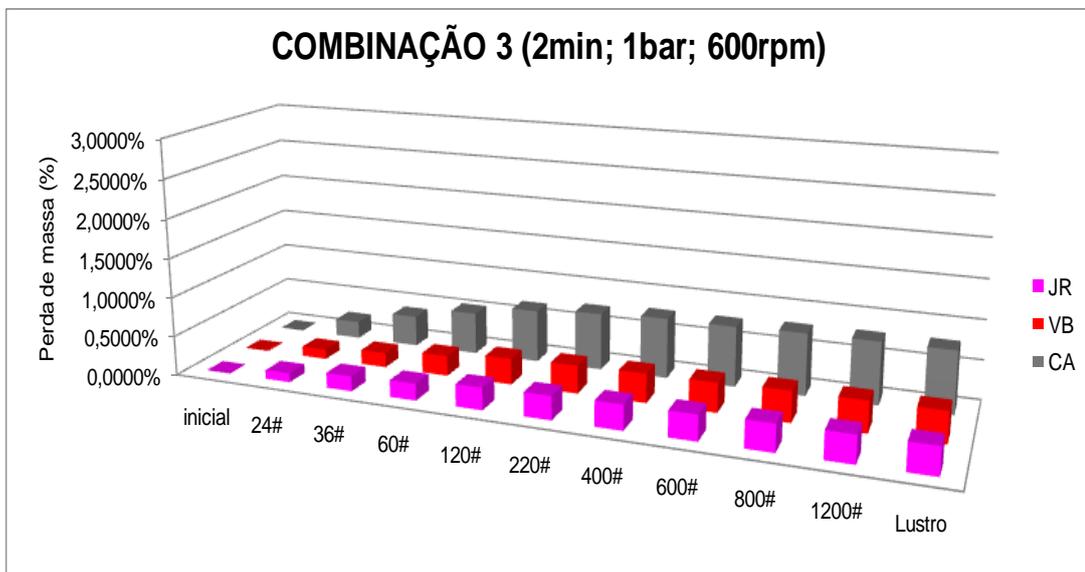


Figura 4.7 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 3ª combinação.

Tabela 4.4 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 4ª Etapa do processo (4min; 1bar; 200rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	983,73	0	1019,14	0	989,50	0
24#	982,12	0,164	1017,26	0,18	988,75	0,08
36#	981,73	0,203	1017,12	0,19	988,46	0,11
60#	981,44	0,233	1016,92	0,22	988,11	0,14
120#	981,02	0,275	1016,14	0,29	987,46	0,21
220#	980,84	0,294	1015,96	0,31	987,32	0,22
400#	980,73	0,305	1015,62	0,35	987,05	0,25
600#	980,45	0,333	1015,13	0,39	986,78	0,27
800#	980,41	0,337	1014,99	0,41	986,76	0,28
1200#	980,12	0,367	1014,61	0,44	986,71	0,28
Lustro	979,80	0,399	1014,35	0,47	986,52	0,3
<b>TOTAL</b>	<b>3,93</b>	<b>2,91</b>	<b>4,79</b>	<b>3,25</b>	<b>2,98</b>	<b>2,14</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

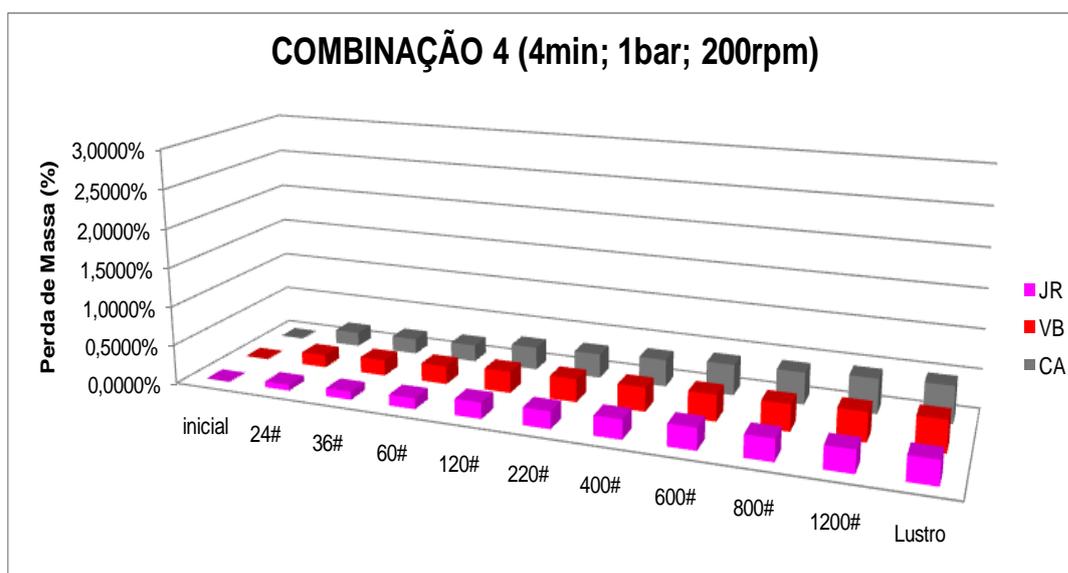


Figura 4.8 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 4ª combinação.

Tabela 4.5 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 5ª Etapa do processo (4min; 1bar; 400rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	992,90	0	974,44	0	988,25	0
24#	991,39	0,15	972,02	0,25	986,92	0,13
36#	990,25	0,27	971,11	0,34	986,30	0,2
60#	987,79	0,52	968,83	0,58	985,27	0,3
120#	987,16	0,58	968,79	0,58	985,23	0,31
220#	986,89	0,61	968,43	0,62	985,04	0,33
400#	986,54	0,64	968,36	0,62	984,80	0,35
600#	986,46	0,65	968,29	0,63	984,75	0,35
800#	986,45	0,65	968,08	0,65	984,73	0,36
1200#	986,43	0,65	967,87	0,67	984,65	0,37
Lustro	986,42	0,65	967,70	0,7	984,48	0,38
<b>TOTAL</b>	<b>6,48</b>	<b>5,37</b>	<b>6,74</b>	<b>5,64</b>	<b>3,77</b>	<b>3,08</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

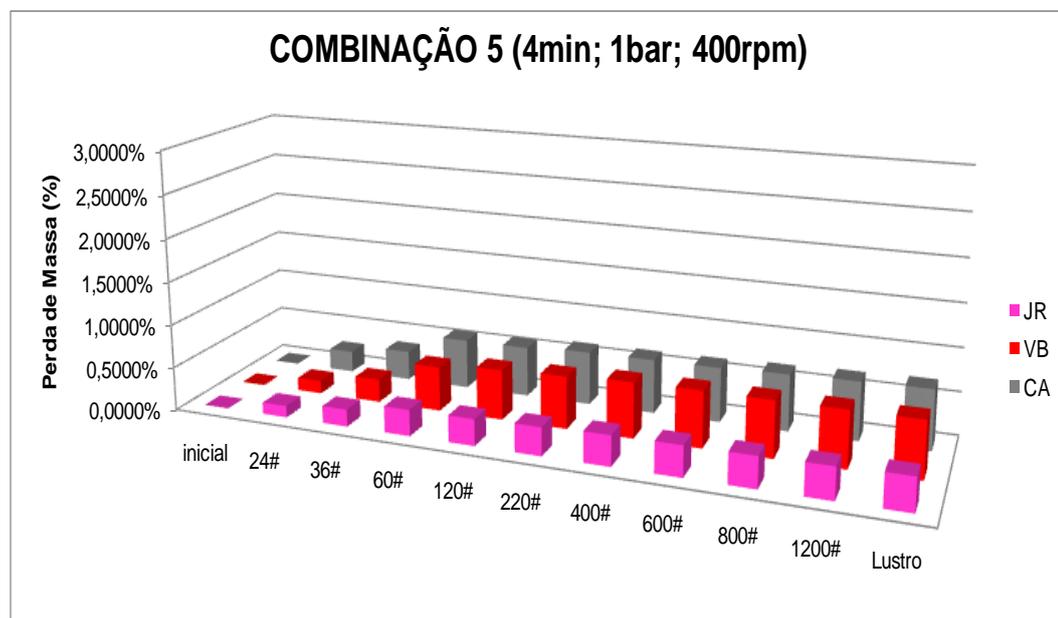


Figura 4.9 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 5ª combinação.

Tabela 4.6 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 6ª Etapa do processo (4min; 1bar; 600rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	1009,82	0	936,89	0	977,49	0
24#	1007,17	0,26	933,00	0,42	974,83	0,27
36#	1005,41	0,44	930,23	0,71	973,39	0,42
60#	1002,75	0,7	930,23	1,08	971,42	0,62
120#	1002,25	0,75	925,90	1,17	970,79	0,69
220#	1001,28	0,85	924,75	1,3	970,10	0,77
400#	1001,03	0,87	924,71	1,3	969,94	0,77
600#	1000,90	0,88	924,39	1,33	969,74	0,79
800#	1000,80	0,89	924,24	1,35	969,58	0,81
1200#	1000,62	0,91	924,23	1,35	969,50	0,82
Lustro	1000,58	0,92	924,03	1,37	969,45	0,82
<b>TOTAL</b>	<b>9,24</b>	<b>7,47</b>	<b>12,86</b>	<b>11,38</b>	<b>8,04</b>	<b>6,78</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

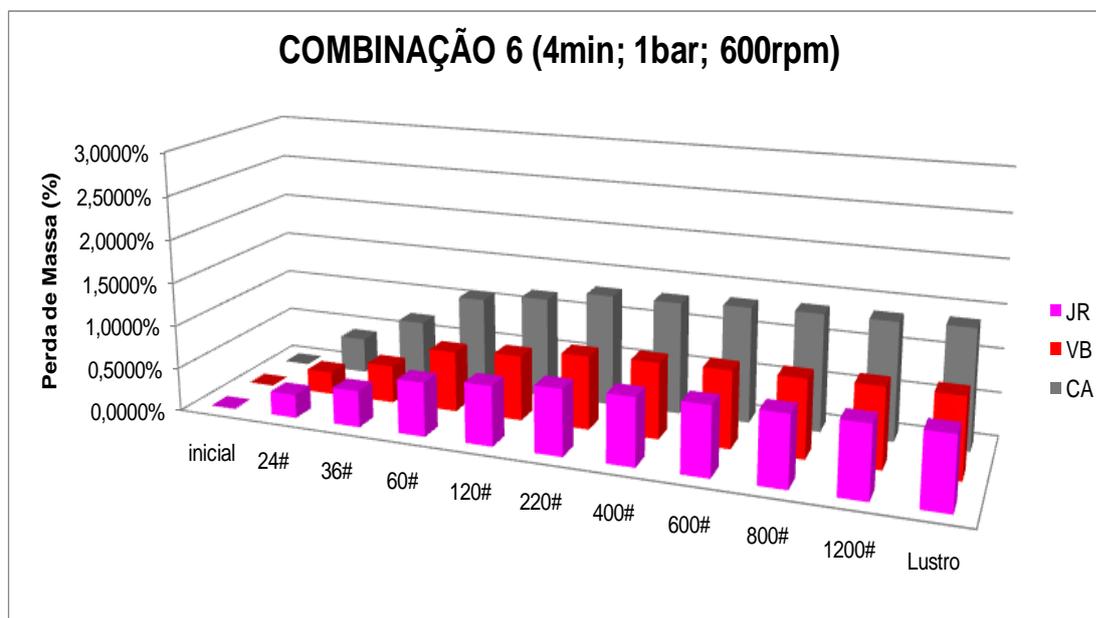


Figura 4.10 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 6ª combinação.

Tabela 4.7 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 7ª Etapa do processo (6min; 1bar; 200rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	969,45	0	896,47	0	985,83	0
24#	968,34	0,12	895,56	0,1	985,69	0,02
36#	967,67	0,18	894,98	0,17	985,15	0,07
60#	967,25	0,23	894,8	0,19	984,96	0,09
120#	967,01	0,25	894,45	0,23	984,67	0,12
220#	966,9	0,26	894,16	0,26	984,42	0,14
400#	966,79	0,27	893,82	0,3	984,06	0,18
600#	966,65	0,29	893,75	0,3	983,97	0,19
800#	966,33	0,32	893,66	0,31	983,96	0,19
1200#	966,12	0,34	893,56	0,32	983,93	0,19
Lustro	965,97	0,36	893,15	0,37	983,91	0,19
<b>TOTAL</b>	<b>3,48</b>	<b>2,62</b>	<b>3,32</b>	<b>2,55</b>	<b>1,92</b>	<b>1,38</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

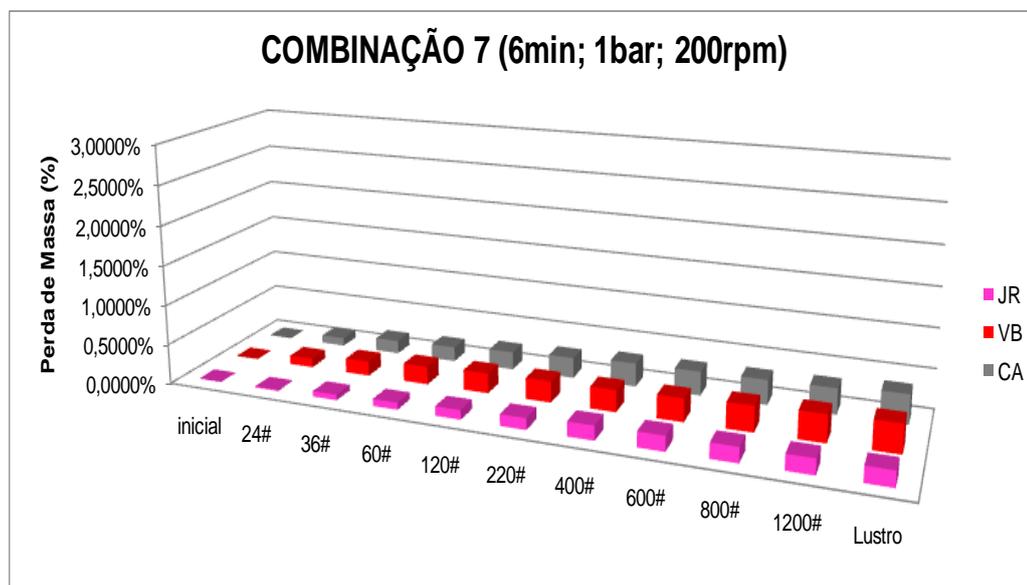


Figura 4.11 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 7ª combinação.

Tabela 4.8 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 8ª Etapa do processo (6min; 1bar; 400rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	971,18	0	1078,92	0	969,9	0
24#	968,65	0,26	1075,56	0,31	967,88	0,21
36#	967,41	0,39	1074,24	0,43	966,95	0,3
60#	966,43	0,49	1073,71	0,48	966,47	0,35
120#	965,61	0,57	1072,11	0,63	966,23	0,38
220#	965,04	0,63	1071,76	0,66	965,8	0,42
400#	964,6	0,68	1070,86	0,75	965,41	0,46
600#	964,5	0,69	1070,5	0,78	965,27	0,48
800#	964,47	0,69	1070,36	0,79	965,22	0,48
1200#	964,4	0,7	1070,34	0,8	965,19	0,49
Lustro	964,31	0,7	1070,06	0,82	965,12	0,49
<b>TOTAL</b>	<b>6,87</b>	<b>5,8</b>	<b>8,86</b>	<b>6,45</b>	<b>4,78</b>	<b>4,06</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

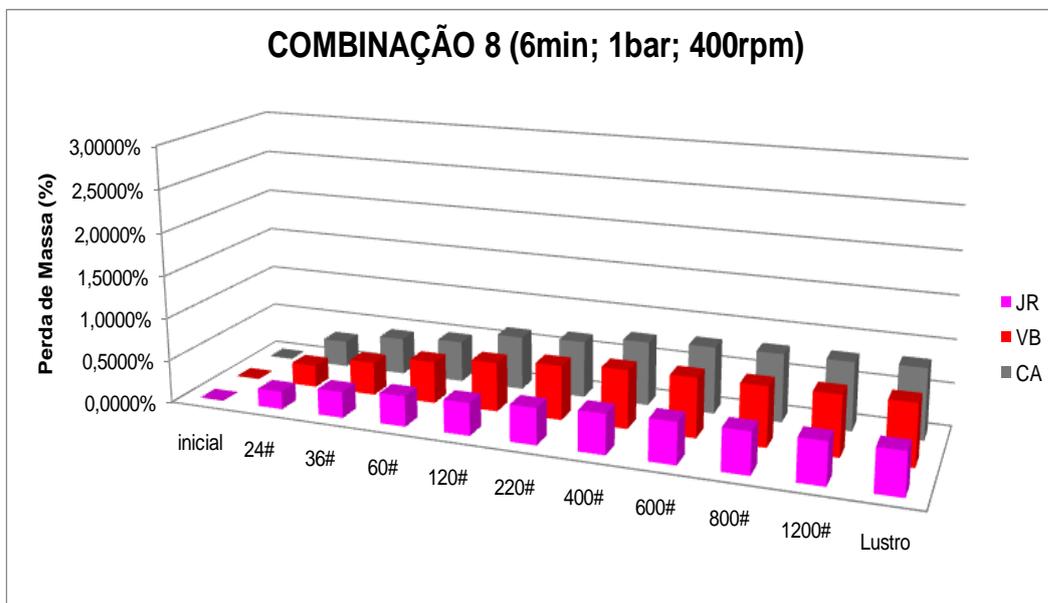


Figura 4.12 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 8ª combinação.

Tabela 4.9 - Valores das Massas e das Perdas de Massa respectivamente dos 3 tipos litológicos durante a 9ª Etapa do processo (6min; 1bar; 600rpm).

Etapa Abrasiva (#)	VB		CA		JR	
	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)	Peso (g)	Perda (%)
Inicial	992,63	0	935,13	0	994,39	0
24#	990,54	0,21	931,07	0,43	992,16	0,22
36#	987,96	0,47	926,33	0,94	990,09	0,43
60#	986,19	0,65	923,85	1,21	988,37	0,61
120#	984,5	0,82	920,51	1,56	986,94	0,75
220#	983,23	0,95	919,01	1,72	986,1	0,83
400#	982,61	1,01	918,67	1,76	985,75	0,87
600#	982,52	1,02	911,99	1,79	985,67	0,88
800#	982,51	1,02	911,08	1,88	985,65	0,88
1200#	982,42	1,03	911,01	1,89	985,54	0,89
Lustro	982,3	1,04	910,58	1,94	985,47	0,9
<b>TOTAL</b>	<b>10,33</b>	<b>8,22</b>	<b>24,55</b>	<b>15,12</b>	<b>8,92</b>	<b>7,26</b>

Legenda: VB – Vermelho Brasília; CA – Cinza Andorinha; JR – Jacarandá Rosado.

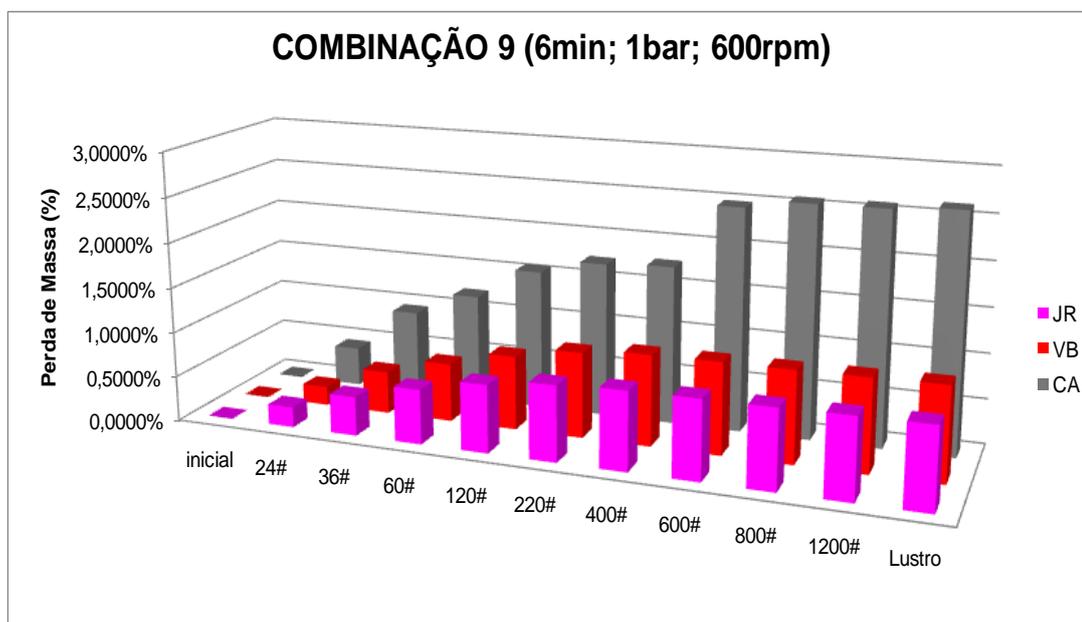


Figura 4.13 - Gráfico da Perda de massa x granulometria do abrasivo das 3 rochas estudadas na 9ª combinação.

Nas rochas estudadas, as perdas de massa seguiram uma ordem crescente em praticamente todas as combinações, iniciando a partir do Jacarandá Rosado, Vermelho Brasília e Cinza Andorinha, com exceção da combinação 2, sendo invertida a posição das duas primeiras rochas, portanto: Vermelho Brasília, Jacarandá Rosado e Cinza Andorinha.

### 4.3 Medidas de Brilho

Foi utilizado o aparelho *Glossmeter* (apresentado no capítulo 3) para a obtenção dos valores de brilho e em cada amostra realizadas 6 leituras, em intervalos de 60°. Como os tipos de rochas estudadas têm diferentes composições mineralógicas, estruturais e texturais, os brilhos obtidos também foram diferentes.

Os gráficos a seguir, serão apresentadas as medidas de brilho em cada combinação para os “granitos” estudados.

- VERMELHO BRASÍLIA

Na Figura 4.14, são mostradas as 6 medidas de brilho para cada corpo-de-prova durante as combinações 1, 2, 3 e 4 do “granito” Vermelho Brasília.

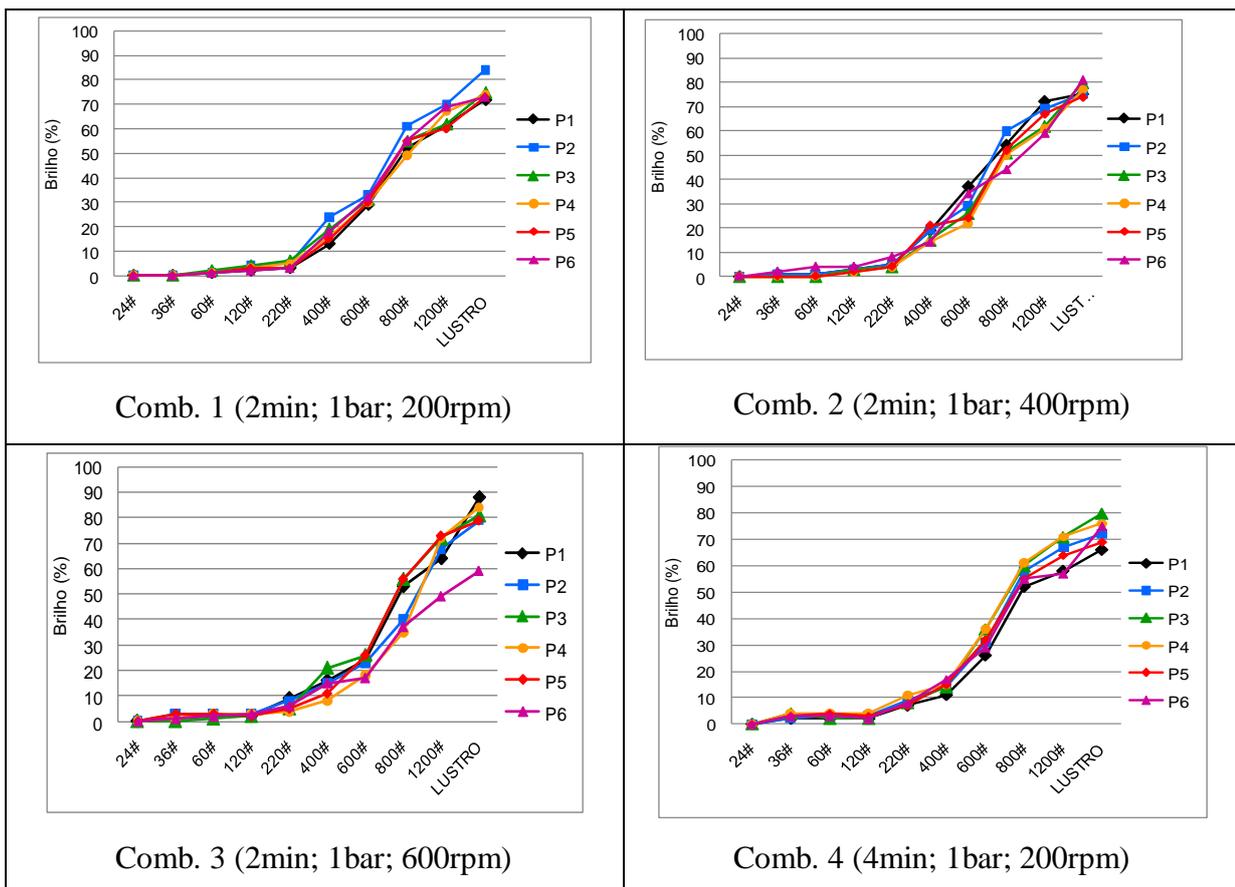


Figura 4.14 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Vermelho Brasília nas combinações 1, 2, 3 e 4 do polimento.

Na Figura 4.15, as combinações restantes, 5, 6, 7, 8 e 9 do “granito” Vermelho Brasília.

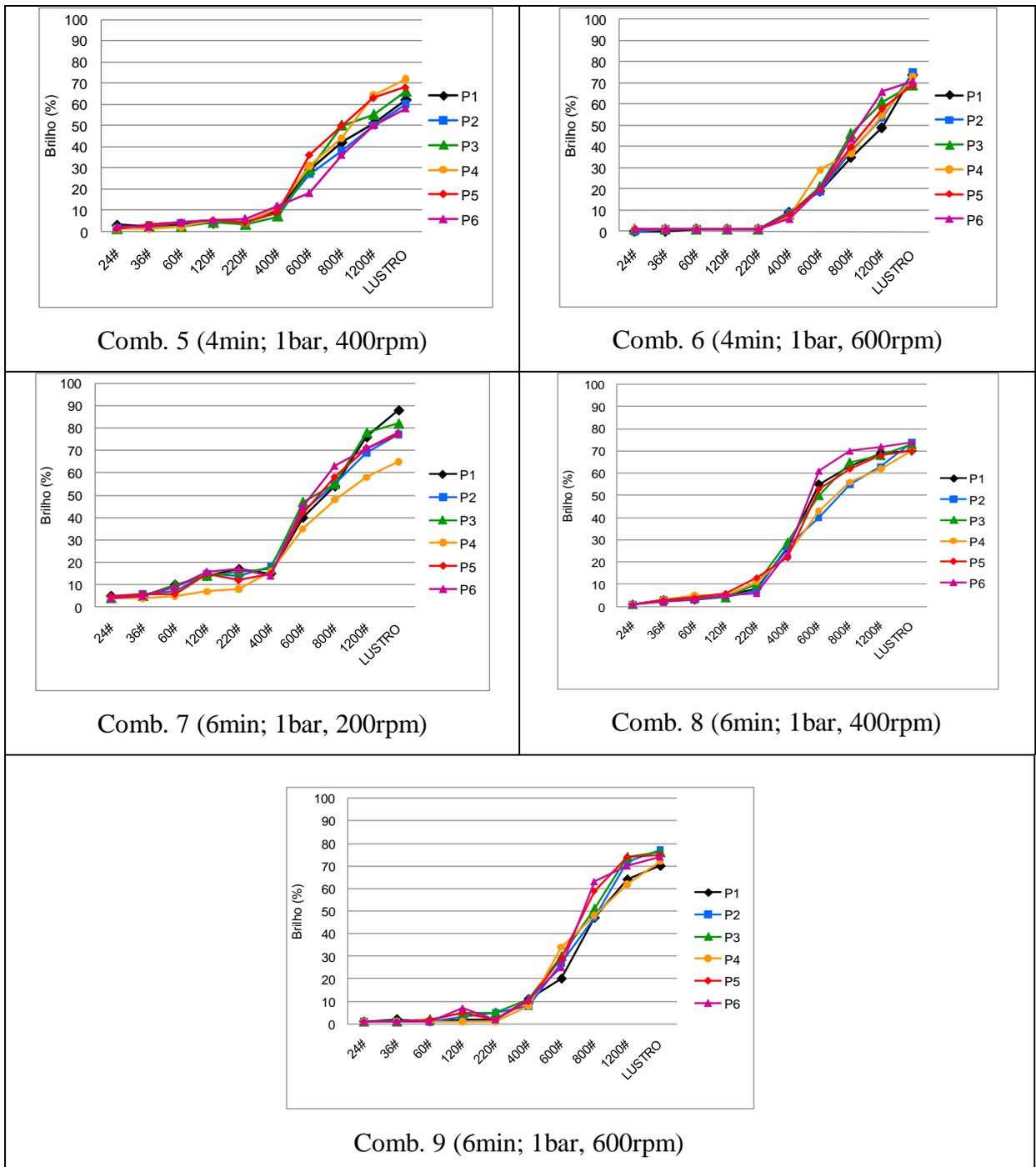


Figura 4.15 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Vermelho Brasília nas combinações 5, 6, 7, 8 e 9 do polimento.

• CINZA ANDORINHA

Na Figura 4.16, são ilustradas as 6 medidas de brilho para cada corpo-de-prova durante as combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do “granito” Cinza Andorinha.

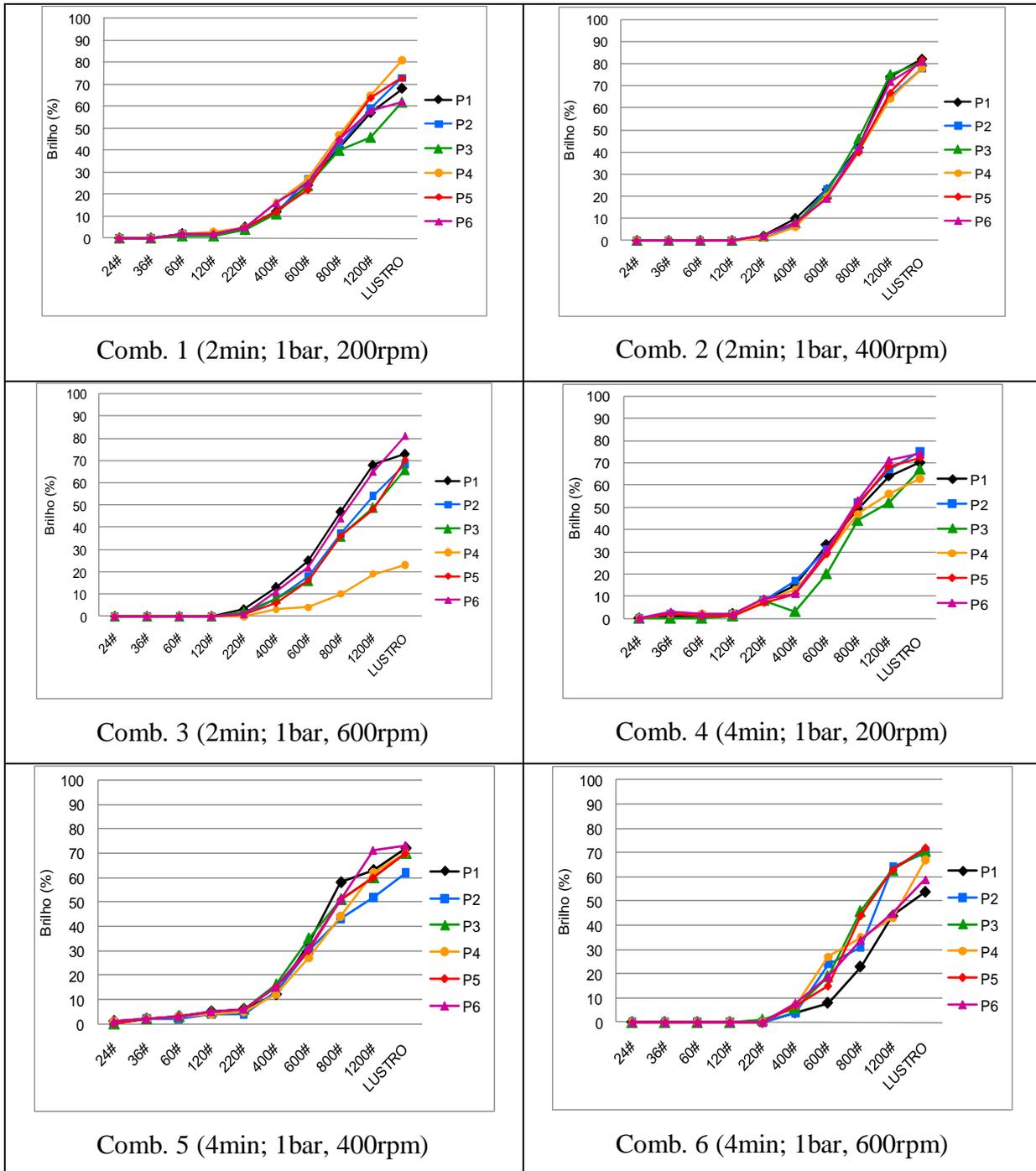


Figura 4.16 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Cinza Andorinha nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do polimento.

Na Figura 4.17, as combinações restantes, 7, 8 e 9 do “granito” Cinza Andorinha.

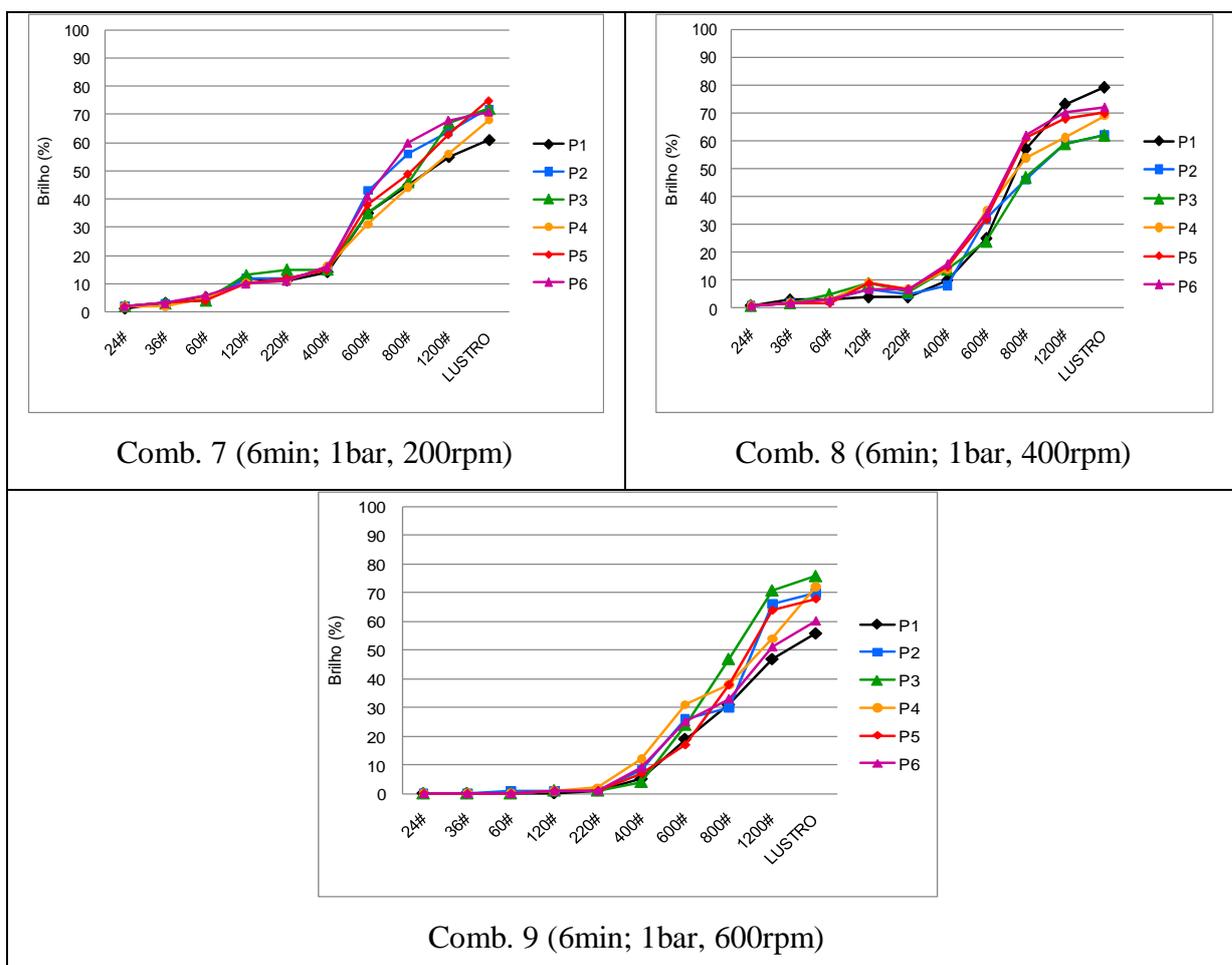


Figura 4.17 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Cinza Andorinha nas combinações 7, 8 e 9 do polimento.

• JACARANDÁ ROSADO

Na Figura 4.18, são mostradas as 6 medidas de brilho para cada corpo-de-prova durante as combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do “granito” Jacarandá Rosado.

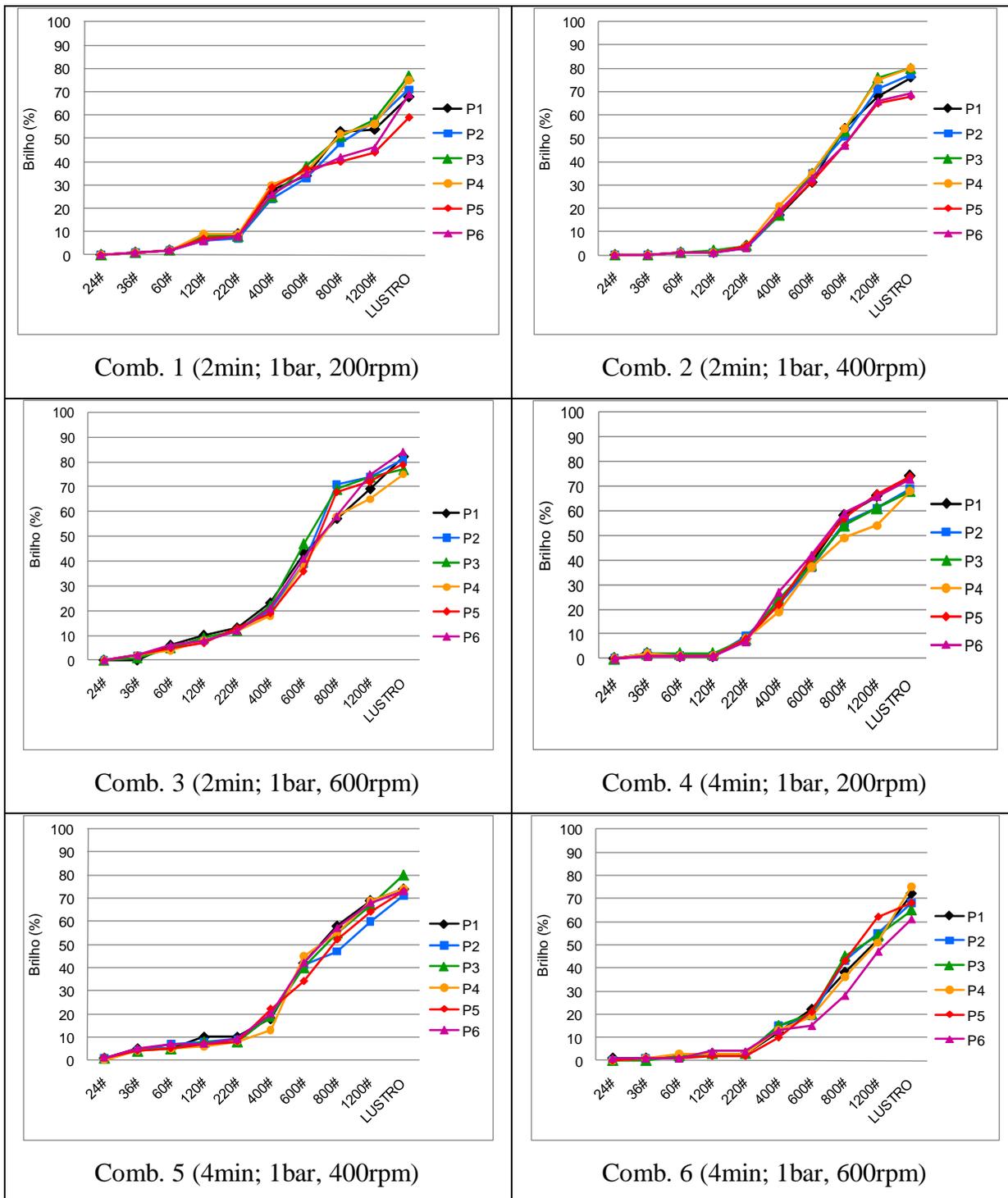


Figura 4.18 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Jacarandá Rosado nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do polimento.

Na Figura 4.19, as combinações restantes, 7, 8 e 9 do “granito” Jacarandá Rosado.

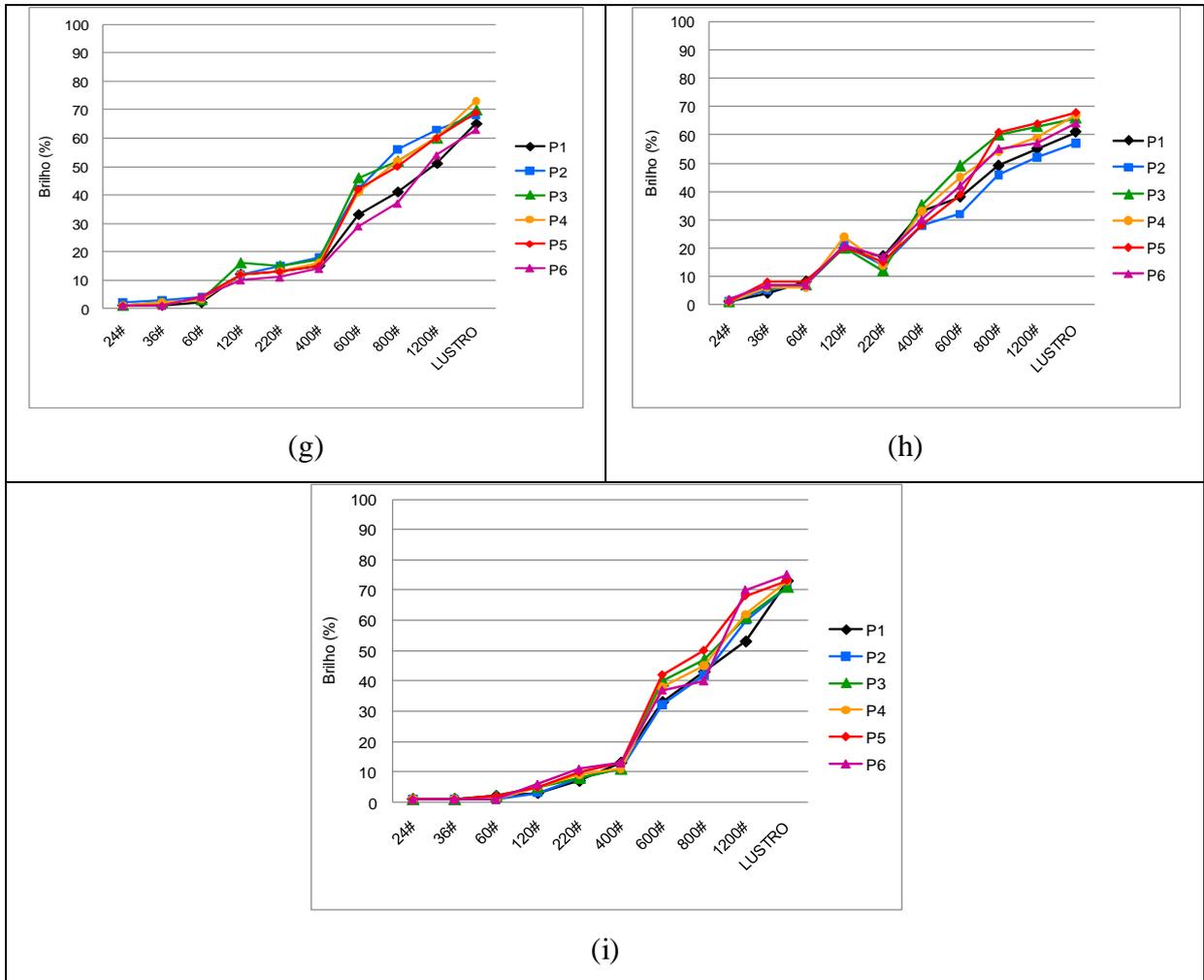


Figura 4.19 - Medidas de brilho x grana abrasiva do “granito” Jacarandá Rosado nas 7, 8 e 9 do polimento.

#### 4.4 Brilhos Pontuais

Durante o processo de polimento foram observados alguns valores de brilho fora da tendência dos outros intervalos de pontos medidos no mesmo corpo-de-prova. Para análise de imagens, foi escolhido o “granito” Cinza Andorinha, que ficou evidenciado no trecho 3 de medida de brilho, durante a quarta combinação (4min; 1bar, 200rpm) a discordância com os demais pontos, como mostra a Figura 4.20.

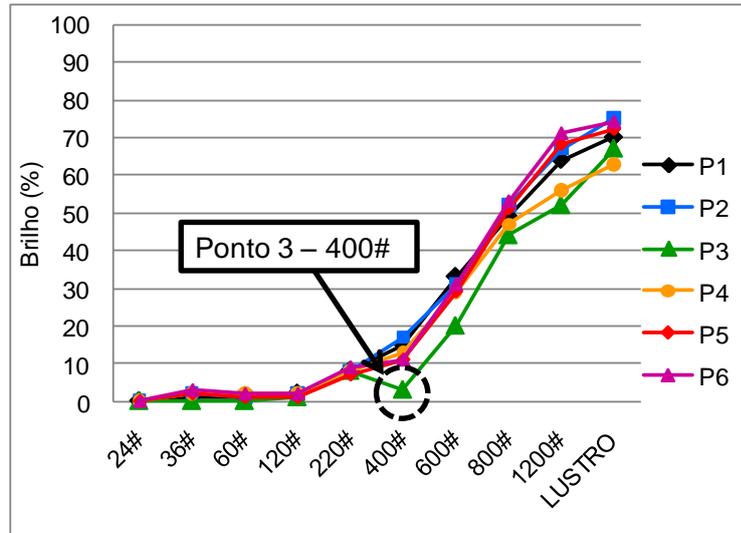


Figura 4.20 - Discordância do ponto 3 da medida de brilho durante a 4ª combinação de polimento (1bar; 2min; 200rpm) do Monzogranito Cinza Andorinha.

As superfícies com minerais de diferentes durezas, tamanhos, clivagens, etc., durante o polimento, apresentam pontualmente, valores diferentes de brilhos, mas no final do processo tornam-se uniformes, como verificado na figuras abaixo.

A Figura 4.21 mostra a sequências de polimento do ponto 3, na 4ª combinação, durante as etapas abrasivas 24# e 36#.

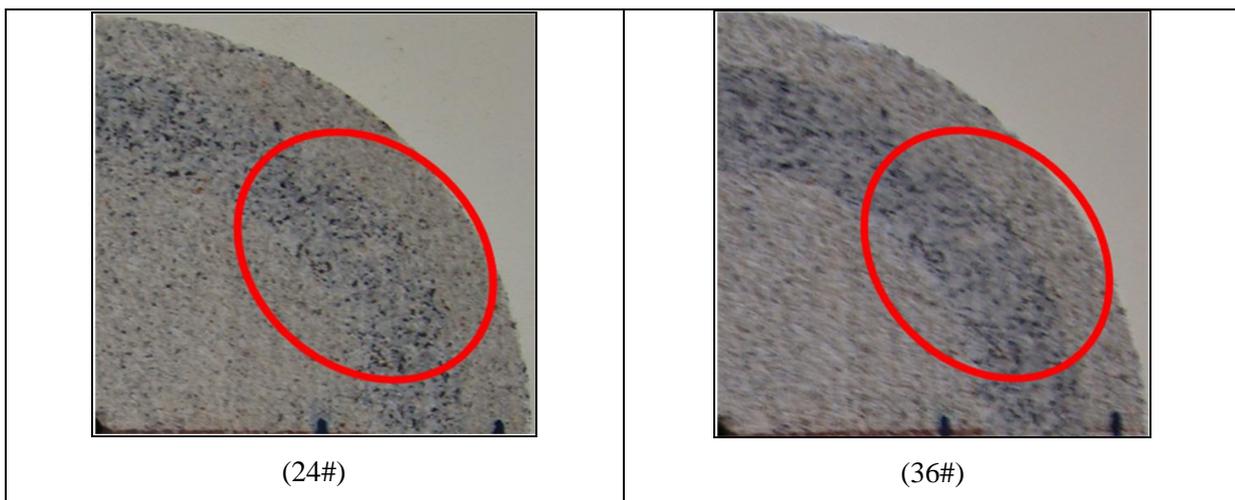


Figura 4.21 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4 minutos, 1bar, 200rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 24# e 36#.

A Figura 4.22 mostra as seqüências de polimento do ponto 3, 60#, 120#, 220#, 400#, 600# e 800#.

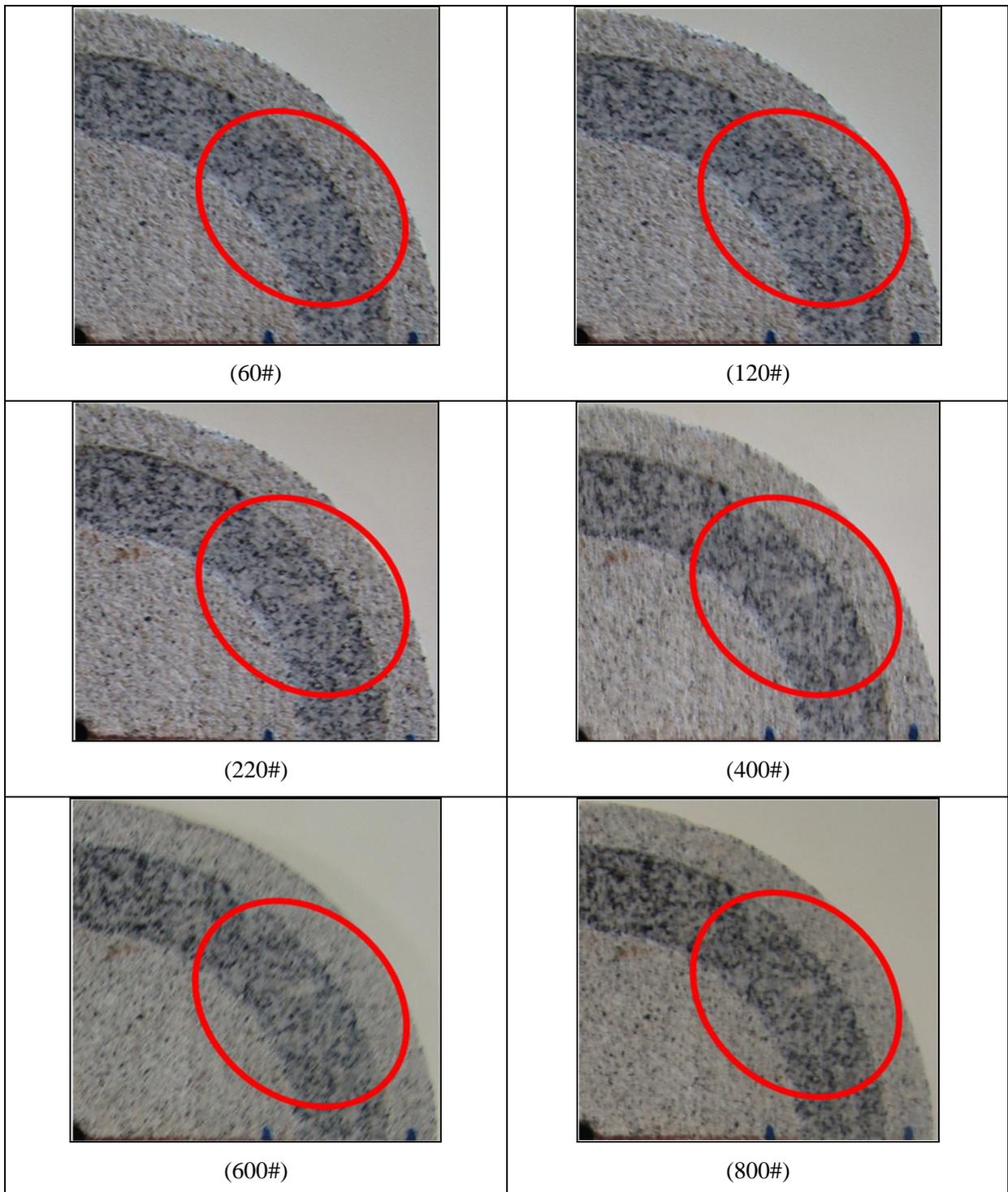


Figura 4.22 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4 minutos, 1 bar, 200 rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 60#, 120#, 220#, 400#, 600# e 800#.

A Figura 4.23 mostra as seqüências restantes de polimento do ponto 3, 1200# e lustro.

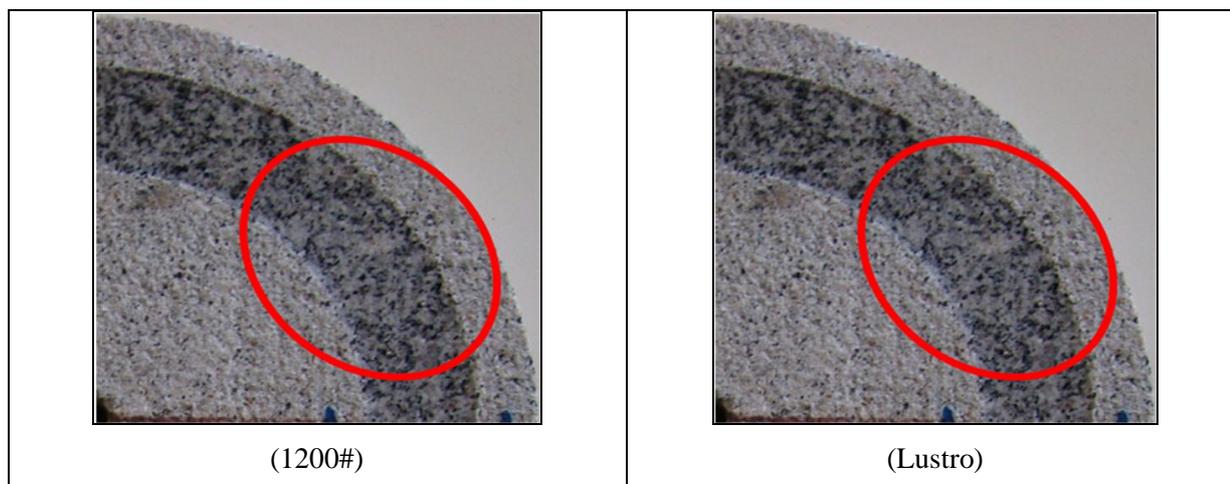


Figura 4.23 - Sequências de polimento do ponto 3 de leitura de brilho na 4ª comb. (4 minutos, 1 bar, 200 rpm) do “granito” Cinza Andorinha durante as etapas abrasivas 1200# e lustro.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

### 5.1 Rugosidade Inicial

Os valores médios de  $R_t$  das rochas estudadas, nas combinações 1, 2 e 3 do processo são:  $360,83\mu\text{m}$  para o “granito” Vermelho Brasília,  $332,67\mu\text{m}$  para o “granito” Cinza Andorinha e  $325,33\mu\text{m}$  para o “granito” Jacarandá Rosado, que correspondem uma pequena variação ( $36\mu\text{m}$ ), que pouco influenciou na primeira etapa do polimento. Isso equivale dizer que os “granitos” estudados partiram de uma condição inicial de rugosidade semelhante, o que é favorável para estudo do polimento das rochas consideradas.

### 5.2 Perda de Massa

Em todas as rochas estudadas, como esperado, houve a maior perda de massa durante o levigamento (24#, 36#, 60# e 120#), pela retirada das imperfeições da rocha deixadas pelo processo de serragem.

Diante dos padrões de desgaste, as perdas de massa em todas as combinações seguiram uma ordem crescente, iniciando a partir do Jacarandá Rosado, Vermelho Brasília e Cinza Andorinha. Foi observado também, que para os três tipos de rochas a sequência de menores perdas ocorreu nas combinações 1, 7 e 4 e as de maiores perdas nas combinações 9, 6 e 8.

As perdas de massa no “granito” Vermelho Brasília nas combinações 9, 6 e 8 foram de 1,04%, 0,91% e 0,71 e para as combinações 1, 7 e 4 foram de 0,20%, 0,36% e 0,40%, como ilustra a Figura 5.1.

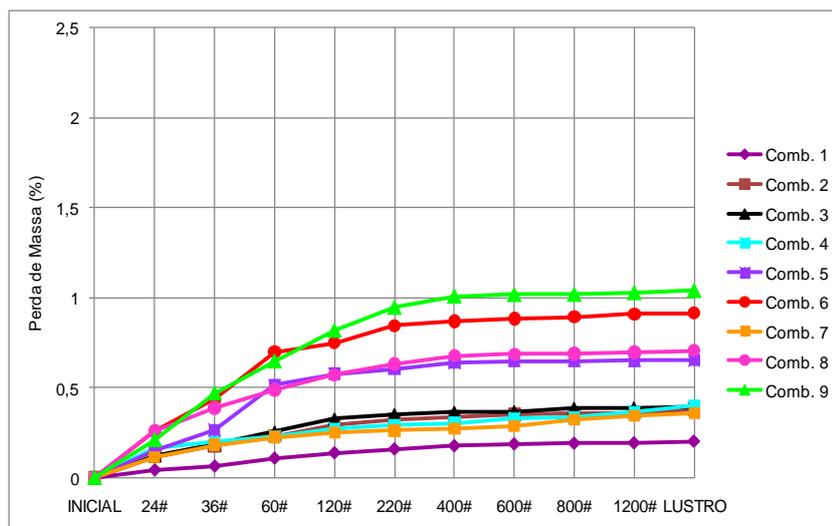


Figura 5.1 - Gráfico de perda de massa do “granito” Vermelho Brasília nas 9 combinações.

Para o “granito” Cinza Andorinha, as maiores perdas de massa foram de 1,94%, 1,37% e 0,82% e para as combinações de menor perda foram de 0,28%, 0,37% e 0,47%, como mostra a Figura 5.2.

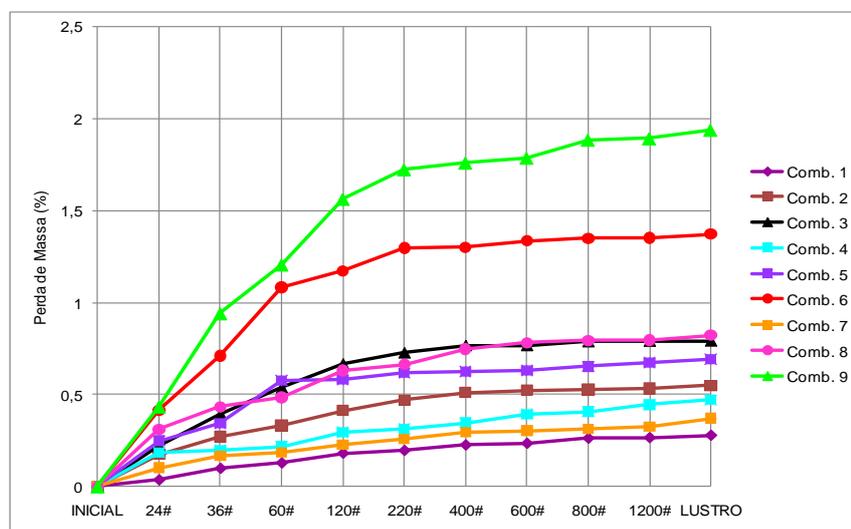


Figura 5.2 - Gráfico de perda de massa do “granito” Cinza Andorinha nas 9 combinações.

E para o “granito” Jacarandá Rosado esses valores foram de 0,90%, 0,82% e 0,49% e de 0,15%, 0,19% e 0,30%, respectivamente para as combinações de maiores e menores perdas de massa, como ilustra a Figura 5.3.

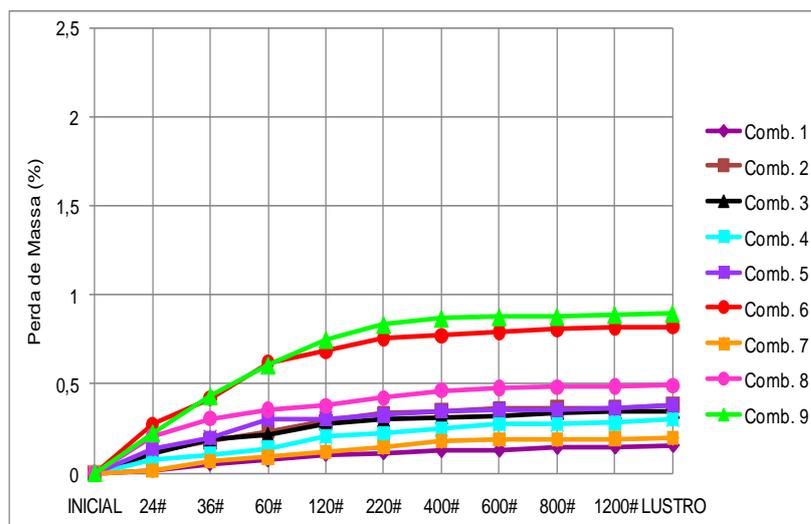


Figura 5.3 - Gráfico de perda de massa do “granito” Jacarandá Rosado nas 9 combinações.

Em todos os casos, a menor perda foi na combinação 1 (2min; 1bar; 200rpm), que possui os menores valores de velocidade e de tempo de exposição. As amostras evidenciaram outra similaridade representada pela maior perda de massa na combinação 9 (6min; 1bar; 600rpm), onde são maiores a velocidade e o tempo de exposição aos abrasivos.

### 5.3 Brilho

Para todas as rochas ensaiadas, o brilho foi medido nas 10 etapas abrasivas e calculado a média em todas as combinações.

O brilho apresentou valores desejáveis (70% exigido pelo mercado) em praticamente todas as combinações, tanto para o Vermelho Brasília quanto para o Jacarandá Rosado. Neste caso, ocorreu uma exceção na combinação 5 com 64,33% para a primeira rocha, e na combinação 1 com 69,83% para a segunda. Já o Cinza Andorinha, apenas em 2 combinações atingiram o brilho mínimo, na combinação 2 (80,3%) e na combinação 4 (70,2%), como mostram as Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Vermelho Brasília.

<b>MÉDIAS DE BRILHO - VERMELHO BRASÍLIA</b>										
	<b>24#</b>	<b>36#</b>	<b>60#</b>	<b>120#</b>	<b>220#</b>	<b>400#</b>	<b>600#</b>	<b>800#</b>	<b>1200#</b>	<b>Lustro</b>
<b>comb. 1</b>	0,00	0,00	1,17	3,00	4,17	17,50	30,83	54,50	64,83	75,17
<b>comb. 2</b>	0,00	0,67	1,00	2,83	5,00	17,00	28,67	51,83	65,00	77,00
<b>comb. 3</b>	0,00	1,50	2,33	2,50	6,17	14,33	22,33	46,17	66,33	78,33
<b>comb. 4</b>	0,00	3,00	3,00	2,67	8,33	14,33	31,67	56,83	64,67	73,00
<b>comb. 5</b>	1,50	2,17	3,17	4,50	4,17	9,67	28,33	43,33	55,50	<b>64,33</b>
<b>comb. 6</b>	0,67	0,83	1,00	1,00	1,00	7,83	21,33	40,00	57,17	71,83
<b>comb. 7</b>	4,33	5,17	7,83	13,50	14,00	15,83	42,00	55,50	70,50	77,83
<b>comb. 8</b>	1,00	2,83	3,67	4,83	9,17	25,17	50,33	61,83	67,00	71,83
<b>comb. 9</b>	1,00	1,17	1,33	3,83	2,83	9,83	27,50	52,50	69,33	74,00

Tabela 5.2 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Jacarandá Rosado.

<b>MÉDIAS DE BRILHO - JACARANDÁ ROSADO</b>										
	<b>24#</b>	<b>36#</b>	<b>60#</b>	<b>120#</b>	<b>220#</b>	<b>400#</b>	<b>600#</b>	<b>800#</b>	<b>1200#</b>	<b>Lustro</b>
<b>comb. 1</b>	0,00	1,00	2,00	7,33	8,17	27,00	35,50	47,67	52,50	<b>69,83</b>
<b>comb. 2</b>	0,00	0,00	1,00	1,17	3,67	18,17	33,33	51,00	70,17	75,00
<b>comb. 3</b>	0,00	1,50	5,17	8,33	12,33	20,50	40,83	63,50	71,50	79,67
<b>comb. 4</b>	0,00	1,67	1,17	1,17	8,00	22,67	39,00	55,33	62,50	71,00
<b>comb. 5</b>	0,00	1,58	3,17	4,75	10,17	21,58	39,92	59,42	67,00	75,33
<b>comb. 6</b>	0,00	1,63	2,17	2,96	9,08	22,13	39,46	57,38	64,75	73,17
<b>comb. 7</b>	0,00	1,60	2,67	3,85	9,63	21,85	39,69	58,40	65,88	74,25
<b>comb. 8</b>	0,00	1,61	2,42	3,41	9,35	21,99	39,57	57,89	65,31	73,71
<b>comb. 9</b>	0,00	1,61	2,54	3,63	9,49	21,92	39,63	58,14	65,59	73,98

Tabela 5.3 – Médias dos valores de brilho das 9 combinações do “granito” Cinza Andorinha.

<b>MÉDIAS DE BRILHO - CINZA ANDORINHA</b>										
	<b>24#</b>	<b>36#</b>	<b>60#</b>	<b>120#</b>	<b>220#</b>	<b>400#</b>	<b>600#</b>	<b>800#</b>	<b>1200#</b>	<b>Lustro</b>
<b>comb. 1</b>	0,00	0,00	1,83	2,00	5,00	13,00	24,83	43,33	58,17	<b>69,83</b>
<b>comb. 2</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	7,83	20,83	41,83	69,50	80,33
<b>comb. 3</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	8,17	16,83	35,00	50,50	<b>63,50</b>
<b>comb. 4</b>	0,00	1,67	1,17	1,67	5,00	11,67	28,83	49,33	63,00	70,17
<b>comb. 5</b>	0,00	0,83	0,58	0,83	3,17	9,92	22,83	42,17	56,75	<b>66,83</b>
<b>comb. 6</b>	0,00	1,25	0,88	1,25	4,08	10,79	25,83	45,75	59,88	<b>68,50</b>
<b>comb. 7</b>	0,00	1,04	0,73	1,04	3,63	10,35	24,33	43,96	58,31	<b>67,67</b>
<b>comb. 8</b>	0,00	1,15	0,80	1,15	3,85	10,57	25,08	44,85	59,09	<b>68,08</b>
<b>comb. 9</b>	0,00	1,09	0,77	1,09	3,74	10,46	24,71	44,41	58,70	<b>67,88</b>

A etapa abrasiva 220# apresentou em todo processo experimental do polimento um insignificante acréscimo de brilho, permanecendo estável e até mesmo uma diminuição (Figuras 5.4 e 5.5). O que sugere a supressão desta etapa.

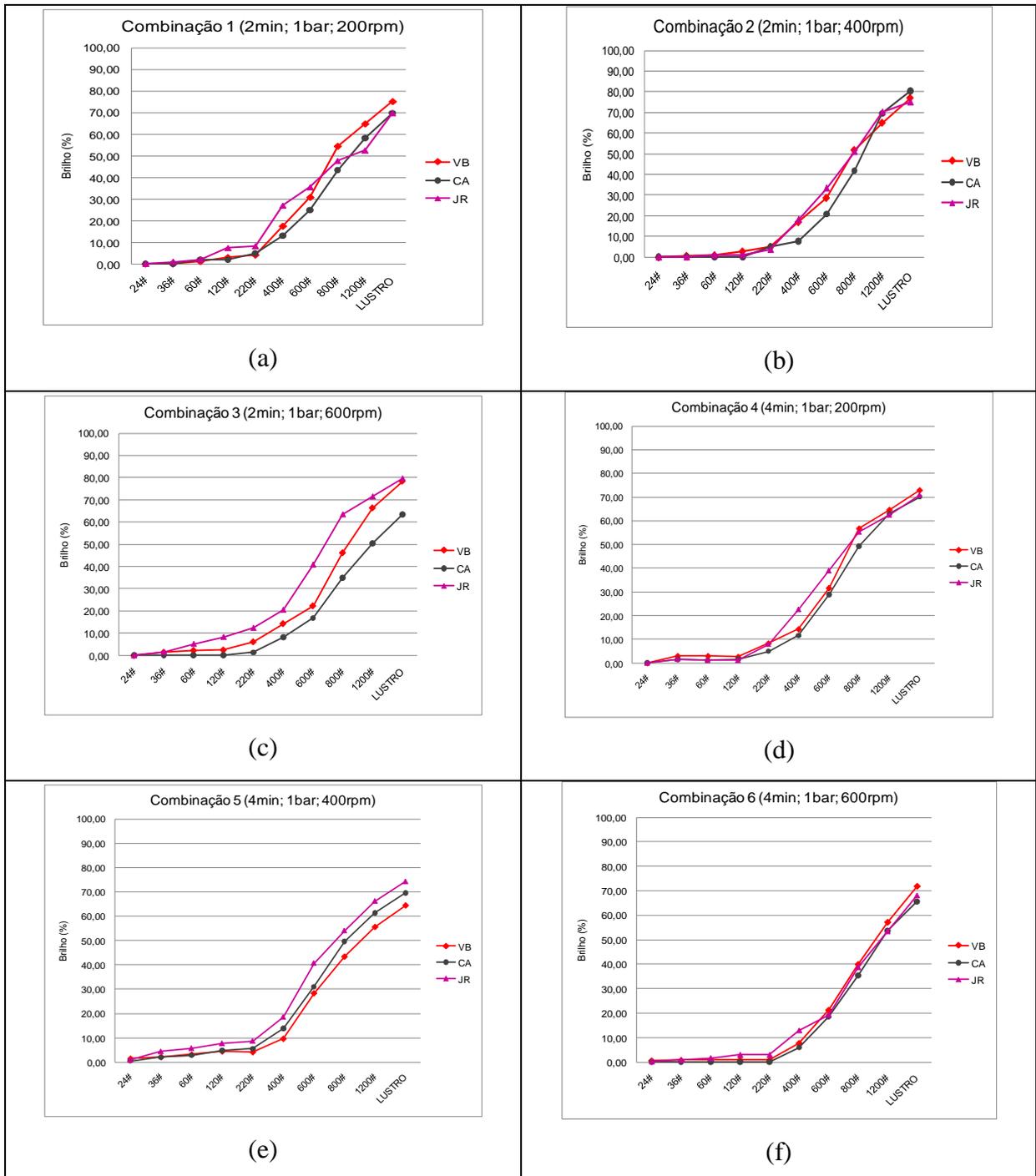


Figura 5.4 - Valores médios de brilho dos três tipos de rochas estudadas nas combinações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

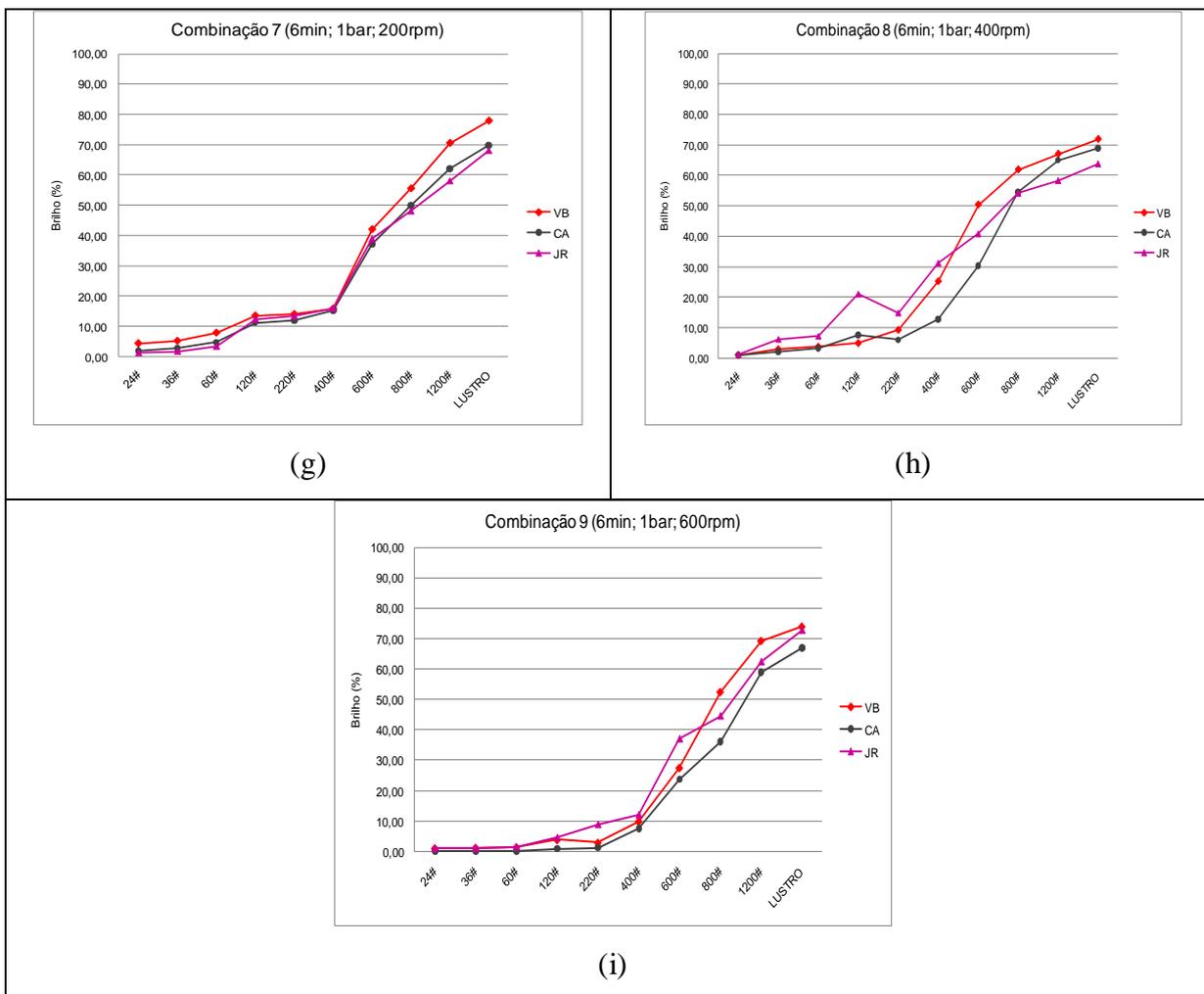


Figura 5.5 - Valores médios de brilho dos três tipos de rochas estudadas nas comb. 7, 8 e 9.

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram que, dentre as 9 combinações, o maior brilho (80,3%) foi alcançado no Cinza Andorinha na combinação 2, seguido do Jacarandá Rosado com 79,7% e o Vermelho Brasília com 78,3%, ambos na combinação 3. Vale ressaltar que em todos os casos o tempo de exposição foi o mesmo, de 2 minutos.

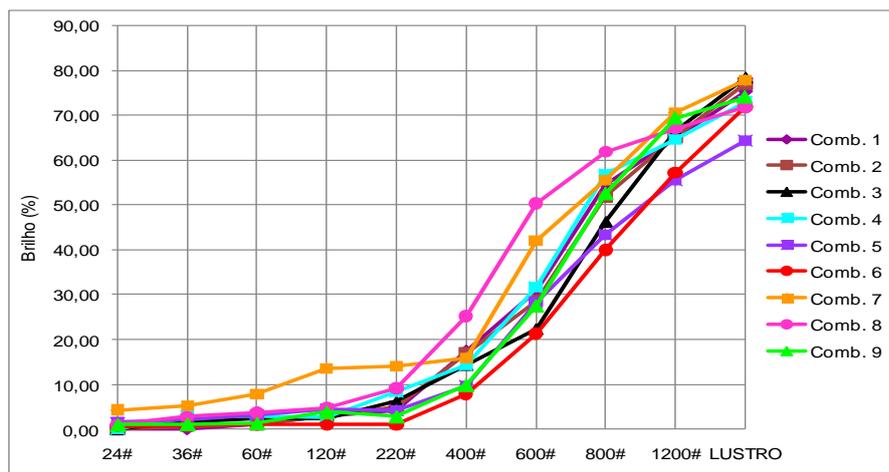


Figura 5.6 - Valores médios de brilho do “granito” Vermelho Brasília nas 9 combinações.

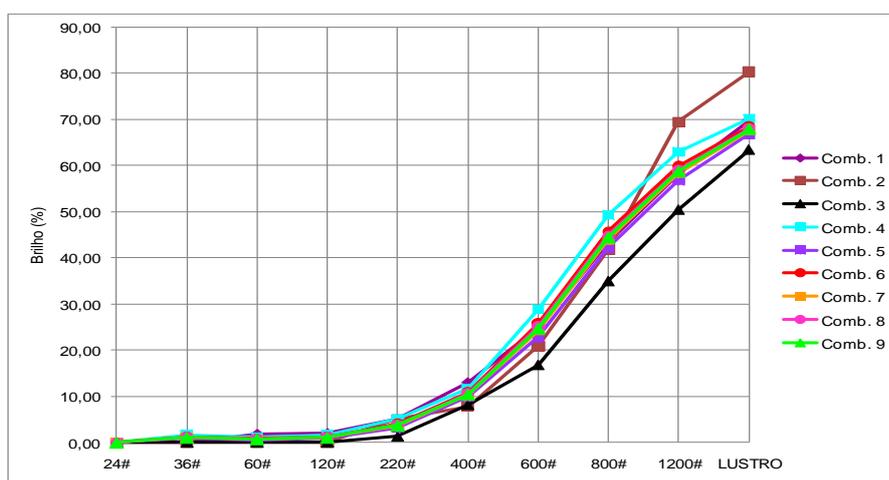


Figura 5.7 - Valores médios de brilho do “granito” Cinza Andorinha nas 9 combinações.

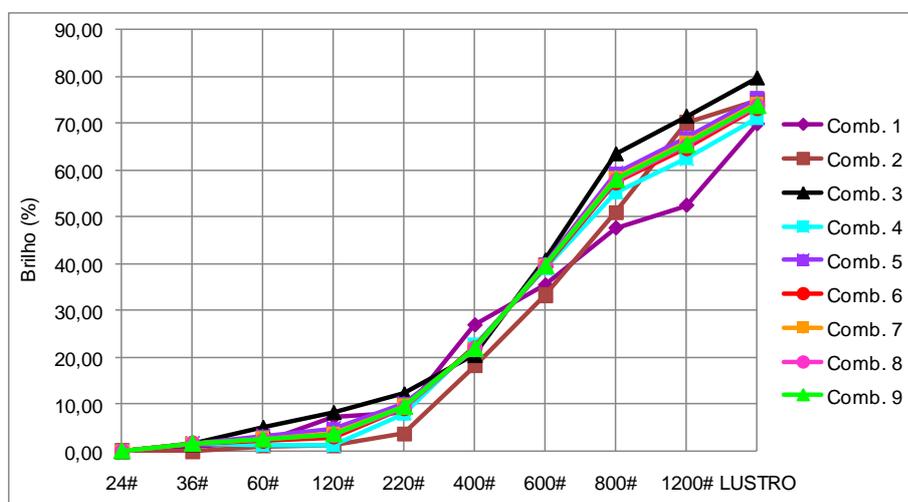


Figura 5.8 - Valores médios de brilho do “granito” Jacarandá Rosado nas 9 combinações.

#### 5.4 Perda de Massa x Brilho

Por se tratar de materiais com características diferentes, não houve correlação entre os valores de perda de massa e o brilho, necessitando um estudo petrográfico comparativo mais detalhado.

Os valores obtidos para o “granito” Vermelho Brasília encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Vermelho Brasília.

Comb.	Tempo (min)	Carga (bar)	Velocidade (rpm)	Brilho (%)	Perda de massa (%)
1	2	1	200	75,17	0,20
2	2	1	400	77,0	0,38
3	2	1	600	78,33	0,39
4	4	1	200	73,0	0,40
5	4	1	400	64,33	0,65
6	4	1	600	71,83	0,91
7	6	1	200	77,83	0,36
8	6	1	400	71,83	0,71
9	6	1	600	74,0	1,04

A partir do cruzamento dos dados de brilho e perda de massa, pode-se afirmar que no Vermelho Brasília, as combinações de maior perda (comb. 9) e menor perda (comb. 1) apresentaram valores de brilho maiores que o exigido pelo mercado (Figura 5.9).

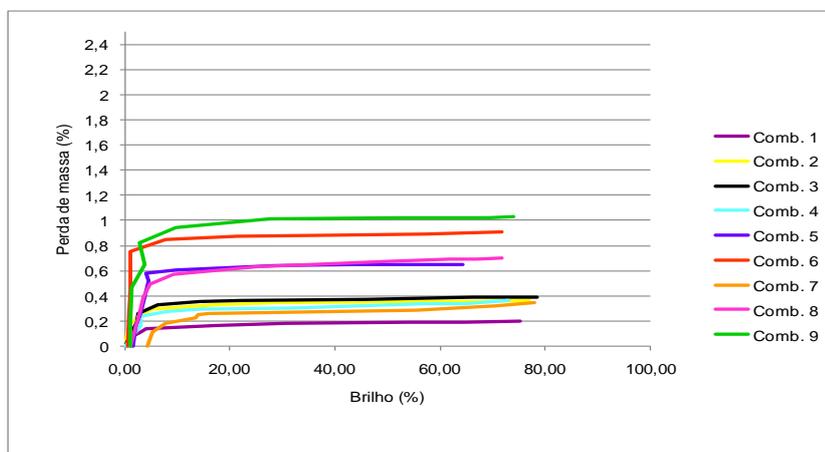


Figura 5.9 - Perda de massa x Brilho do “granito” Vermelho Brasília.

Para o “granito” Cinza Andorinha os valores estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Cinza Andorinha.

Comb.	Tempo (min)	Carga (bar)	Velocidade (rpm)	Brilho (%)	Perda de massa (%)
1	2	1	200	69,83	0,28
2	2	1	400	80,33	0,55
3	2	1	600	63,50	0,79
4	4	1	200	70,17	0,47
5	4	1	400	66,83	0,69
6	4	1	600	68,50	1,37
7	6	1	200	67,67	0,37
8	6	1	400	68,08	0,82
9	6	1	600	67,88	1,94

No “granito” Cinza Andorinha, nas combinações de maior e menor perda de massa (9 e 1 respectivamente) não foi possível alcançar valores maiores que 70% (Figura 5.10).

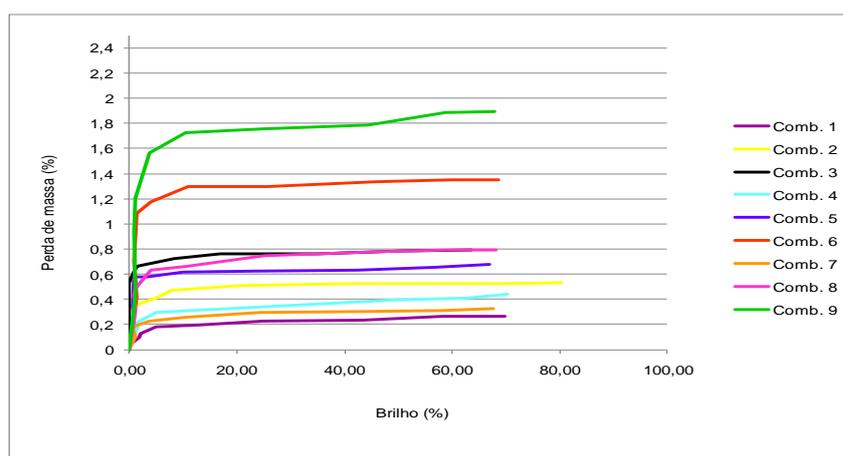


Figura 5.10 - Perda de massa x Brilho do “granito” Cinza Andorinha.

No Jacarandá Rosado, os valores estão representados na Tabela 5.6 abaixo:

Tabela 5.6 - Valores de brilho e perda de massa em todas as combinações do “granito” Jacarandá Rosado.

Comb.	Tempo (min)	Carga (bar)	Velocidade (rpm)	Brilho (%)	Perda de massa (%)
1	2	1	200	69,83	0,15
2	2	1	400	75,0	0,38
3	2	1	600	79,67	0,35
4	4	1	200	71,0	0,30
5	4	1	400	75,33	0,38
6	4	1	600	73,17	0,82
7	6	1	200	74,25	0,19
8	6	1	400	73,71	0,49
9	6	1	600	73,98	0,90

Para o Jacarandá Rosado, a maior perda de massa foi onde o brilho atingiu a média exigida pelo mercado, ilustrada na Figura 5.11.

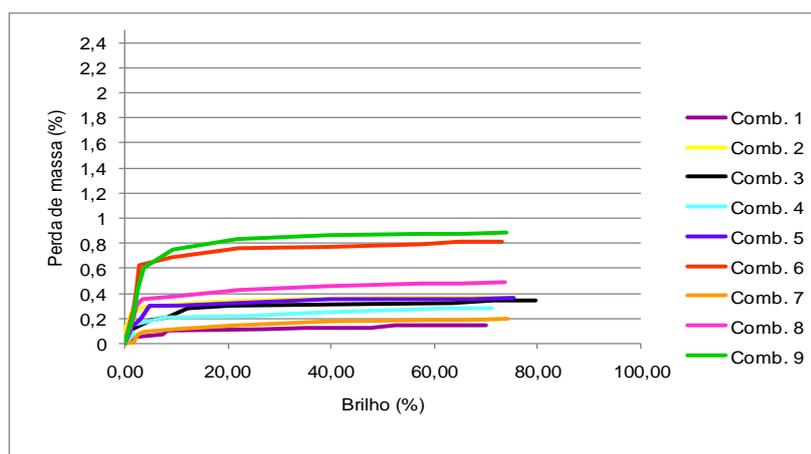


Figura 5.11 - Perda de massa x Brilho do “granito” Jacarandá Rosado.

Analisando os tipos de rochas estudadas, foi constatado que os “granitos” Vermelho Brasília e Jacarandá Rosado tiveram desempenhos semelhantes para as primeiras condições operacionais (combinações 1, 2 e 3), onde o aumento da velocidade resultou no acréscimo de

brilho. Entretanto, o “granito” Cinza Andorinha, na combinação 2 com 400 rpm e na combinação 3 com 600 rpm, houve um decréscimo de brilho de 80,33% para 63,50%, não satisfazendo o valor exigido pela indústria.



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

---

---

### **Perda de massa**

- Nas rochas estudadas (Vermelho Brasília, Cinza Andorinha e Jacarandá Rosado), a maior perda de massa, como o esperado, ocorreu durante a primeira fase do processo de desgaste, em ordem decrescente, nas granas 24, 36, 60 e 120 mehs.
- Para os três tipos de rochas, as maiores perdas foram nas combinações (tempo, carga, velocidade) 9, 6 e 8 e as menores nas combinações 1, 7 e 4.

### **Brilho**

- Os valores de brilho máximo para cada tipo litológico foram atingidos em situações operacionais distintas, isso equivale dizer que rochas de diferentes durezas devem ser tratadas diferentemente, o que não ocorre na indústria.
- As medidas de brilho mostraram um significativo aumento a partir da grana 400# até atingir o lustro.
- O brilho ideal para comercialização que é de 70%, foi conseguido em todas as rochas a uma carga de 1 bar e no menor tempo de operação (2 minutos). Sendo que para o “granito” Cinza Andorinha, a velocidade foi de 400 rpm e para os “granitos” Vermelho Brasília e Jacarandá Rosado de 600 rpm. É um dado importante que poderá fornecer subsídios para indústria quando processar esses tipos de rochas.

- Considerando todas as etapas abrasivas, observou-se que o brilho obtido entre as etapas 120# e 220# foram semelhantes, sugerindo que esta última poderá ser suprimida.

### **Sugestões para futuras pesquisas**

- Dando continuidade aos estudos experimentais já desenvolvidos para o abrasivo magnésiano no departamento (11 tipos de “granitos”), ampliar para outros tipos, visando um banco de dados que servirá para um melhor conhecimento do processo e subsidiar a produção industrial.
- Repetir essas mesmas condições operacionais para esses tipos de rochas usando outros abrasivos como, por exemplo, os resinóides e os diamantados, que atualmente vem ganhando posição no mercado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992a) Materiais Inorgânicos: Determinação do Desgaste por Abrasão: NBR 12042 Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992b) Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência à Flexão: NBR 12763 3p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992c) Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência ao Impacto de Corpo Duro: NBR 12764 3p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992d) Rochas para Revestimento: Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear: NBR 12765 3p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992e) Rochas para Revestimento: Determinação da Massa Específica Seca Aparente, Porosidade Aparente e Absorção d'água Aparente: NBR 12766 Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992f) Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial: NBR 12767 2p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997a) Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio. Anexo E – Determinação da Resistência à Abrasão Profunda: NBR 13818 3p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997b) Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio. Anexo N – Determinação do Coeficiente de Atrito: NBR 13818 2p Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) Terminologias de rochas ornamentais e de Revestimento: NBR 15012 Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010) Rochas para Revestimento: Análise Petrográfica: NBR 15845 Rio de Janeiro.

ARTUR, A. C. & GALEMBECK T. M. B. (2008) “Curso de Rochas Ornamentais”. (Curso de pós-graduação). - IGCE/UNESP, Rio Claro, São Paulo.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994) ASTM D523-94 – “Standard test method for specular gloss”

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2001) ASTM C119-01 – “Standard terminology relating to Dimension Stone”.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2005) ASTM G99-05 – “Standard test method for wear testing with a pin-on-disc apparatus”.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2009) ASTM C880-09 – “Standard Test Method for Flexural Strength of Dimension Stone”

BRANDÃO, W *et. al.* (1991) “Principais Depósitos Minerais do Brasil” In: Mármore, Granitos e Outras Rochas Ornamentais no Brasil. In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E. T., COELHO, C. E. S. (edit.). Brasília, D. N. P. M, v. IV, Parte A, p.371-372.

CARPINETTI, L.C.R. *et al.* (1996) “Rugosidade Superficial: Conceitos e princípios de medição” EESC/USP – Departamento de Engenharia Mecânica. 51p, São Paulo-SP.

CASTRO, E.L. (2009) “Mercado interno aquecido dá novo fôlego ao setor”. Rochas de Qualidade, Ano XLII, edição 208, set/out, p.7.

CETEMAG - CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO “Curso de polidor”. Apostila, 21p, Espírito Santo.

CHIODI FILHO, C. (2008a) “Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento no período de janeiro a novembro de 2008”. ABIROCHAS, Informe 24/2008, São Paulo – SP.

CHIODI FILHO, C. (2008b) “Radioatividade natural em materiais rochosos”. ABIROCHAS, Informe 18/2008, São Paulo – SP.

CHIODI FILHO, C. (2009) “Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2008”. ABIROCHAS, Informe 03/2009, São Paulo – SP.

CHIODI FILHO, C. (2010) “Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento no período de janeiro a maio de 2010”. ABIROCHAS, Informe 09/2010, São Paulo – SP.

COIMBRA FILHO, C. G. (2006) “Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais”. (Dissertação de Mestrado) 200p. – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COSTA, E.M. (2009) “Superar a crise e adaptar-se ao novo estado da economia são os principais desafios do setor”. Rochas de qualidade, Ano XLII, edição 208, set/out, p.14-16.

DANA, J. D. (1983) “Manual de mineralogia”. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A, 642p. Rio de Janeiro – RJ.

ERDOGAN, M. (2000) “Measurements of polished rock surface brightness by image analysis method”. In Engineering Geology 57. p.65-72.

FRAZÃO, E. B. & PARAGUASSU, A. B. (1998) “Materiais Rochosos para Construção”. In: OLIVEIRA, A. M. S. O. & BRITO, S. N. A. (eds.). Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, CNPq/FAPESP, p. 331-342, São Paulo – SP.

FRAZÃO, E. B. (2002) “Tecnologia de Rochas na Construção Civil”. Ed. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 132p.

GRASSELLI, G. (2001) “Shear Strength of Rock Joints on Quantified Surface Description” (Doutorado) 124p. Ecole Polytechnique Federal de Lausanne. Lausanne.

KASCHNER, D. (1996) “Tecnologias para beneficiamento. In: II Encontro do Centro-Oeste Sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais”. 36p. Goiânia-GO.

MOREIRAS, S. T. F. (2005) “Estudo sobre o revestimento de fachadas de edifícios altos com placas de granitos ornamentais”. São Carlos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 80p.

NAVARRO, F. C. (2006) “Influência da petrografia sobre a anisotropia à tensão de compressão e dilatação térmica de rochas ornamentais” (Tese de Doutorado) 179p. Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. Rio Claro – SP.

PARAGUASSU, A. B.; RODRIGUES, J. E. ; RIBEIRO, R. P. (2004) “Medidas de Rugosidade em Chapas de Granitos Ornamentais Serrados em Teares Multilâminas” In: XLII Congresso Brasileiro de Geologia, XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá-MG.

QUITETE, E. B. (2002) “Dureza *knoop* em rochas para revestimento: metodologia e correlação com desgaste abrasivo” (Dissertação de Mestrado) 70p. Universidade de São Paulo - Poli-USP. São Paulo – SP.

RIBEIRO, R. P.; SILVEIRA, L. L. L.; PARAGUASSÚ A. B.; RODRIGUES J. E. (2005) “Aplicação de Bases Conceituais de Tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais”. Revista Minerva, v.1, p.45-50.

RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; SILVEIRA, L. L. L.; ( 2005) “Quantificação da Textura Superficial de Chapas de Granitos Serrados em Teares Multilâminas” In: I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari -ES.

RIBEIRO, R. P. (2005) “Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos”. São Carlos. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 205p.

RIBEIRO, R. P.; SILVEIRA, L. L. L.; PARAGUASSÚ A. B.; RODRIGUES J. E. (2006) “Avaliador de Rugosidade de Chapas – ARC”. Revista Pedras do Brasil, Ano V, nº 47, p.38-41.

SILVEIRA, L. L. L.; RODRIGUES, J. E.; PARAGUASSÚ, A. B. (2008) “A Influência das características petrográficas no polimento de granitos ornamentais” In: 12 Congresso de Geologia de Engenharia e Ambiental, Anais do 12 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, p. 1-11. Porto de Galinhas - PE.

SILVEIRA, L. L. L. (2007) “Estudo Comparativo de Granitos Ornamentais Brasileiros no Processo de Polimento Industrial”. São Carlos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 205p.

SPÍNOLA, S.V.P.A.C. (1998) “Influência da Qualidade da Serragem de Granitos no Consumo Energético do Desbaste” (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 138p, Lisboa.

STACHOWIAK, G. W. & BATCHELOR, A. W. (1993) “Engineering tribology”. 314 p. Amsterdam, Elsevier.

VIDAL, F. W. H.; BESSA, M. F.; LIMA, M. A. B. (1999) “Avaliação das rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas” CETEM/MCT - (Série Tecnologia Mineral, 74). 30 p. Rio de Janeiro.

ZUM-GAHR, K. H. (1987) “Microstructure and wear of materials. Institute of Materials Technology. University of Siegen” Federal Republic of Germany, v.10, 560.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)