

**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ricardo da Cruz Silva

**Avaliação dos tempos de presa de misturas  
cimentícias por resistividade elétrica**



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Ricardo da Cruz Silva

**Avaliação dos tempos de presa de misturas  
cimentícias por resistividade elétrica**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Aires Fernando Fernandes Leite Camões

Azevedo

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição  
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Agradecimentos

Com a conclusão da presente dissertação, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos às pessoas, que de uma forma ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Aires Camões, orientador desta dissertação, expresso os meus sinceros agradecimentos, pela sua orientação e pela sua disponibilidade.

Um agradecimento muito especial ao Engenheiro Carlos Jesus, que durante todo o processo foi crucial para o desenvolvimento desta dissertação, mesmo não sendo oficialmente orientador é como se tivesse sido e ao Engenheiro Carlos Palha que foi fundamental devido à partilha de sabedoria em temas que ultrapassam a Engenharia Civil que foram essenciais nesta dissertação. Também queria agradecer aos professores Manuel Ribeiro e João Abrantes pela colaboração que possibilitaram a realização de ensaios no IPVS de Viana do Castelo.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais, à minha tia e aos meus avós que sempre me apoiaram e que sem eles nada disto seria possível.

Muito obrigado a todos!

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

---

## Avaliação dos tempos de presa de misturas cimentícias por resistividade elétrica

### RESUMO

Nos dias atuais a tecnologia afirma-se a uma velocidade enorme e em todas as áreas, nomeadamente na construção. As tecnologias inovadoras proporcionam novas metodologias com mais eficácia no resultado perante o objetivo atingir.

Na construção, o uso do cimento é fundamental para construirmos infraestruturas, nesse sentido é importante conhecermos toda a informação sobre o produto, nomeadamente o tempo de presa dos diversos tipos de cimentos. A medição do início e fim de presa é efetuada por intermédio de métodos empíricos tradicionais, pela metodologia “Vicat”, em que exige a presença humana especializada para realizar o ensaio.

A nova tecnologia proposta neste trabalho pretende contribuir para a substituição da metodologia tradicional, tendo como diversos objetivos, nomeadamente determinar o início de presa do cimento, registar e analisar a resistividade em todo processo. Este método poderá permitir a quantificação e determinação das fases de hidratação de qualquer cimento com qualquer tipo de adições.

Nesta investigação foi usado um equipamento eletrónico designado por “Arduíno, composto por um sensor de resistividade. No início da investigação, recorrendo a uma campanha experimental, foi necessário ajustar o fator geometria do provete de ensaio, bem como, as condicionantes relacionadas com a distância entre elétrodos e a intensidade da corrente elétrica aplicada.

O uso de diferentes tipos de cimento, nomeadamente três tipos de classes diferentes, CEM 32.5, CEM 42,5 e CEM 52,5, foi considerada, bem como a presença de adições, assim como diferentes razões água / ligante.

A investigação permitiu avaliar uma tecnologia diferente da tradicional, permitindo leituras mais expeditas comparada com o ensaio de Vicat, assim como permite ter em conta o uso de adições e diferentes razões A /L como um método mais expedito neste tipo de trabalhos.

#### **PALAVRAS-CHAVE:**

Tempo de presa, Resistividade, Cimento, Adições

## Evaluation of setting times of cementitious mixtures by electrical resistivity

### ABSTRACT

Nowadays technology asserts itself at huge speed and in all areas, namely construction. Innovative technologies provide new methodologies with more effectiveness in the outcome of the goal achieved.

In construction the use of cement is fundamental to build infrastructure, in this sense it is important to know all the information about the product, namely the setting time of the various types of cements. The measurement of the beginning and end of the setting time is measured by traditional method, by the “Vicat” methodology, in which it requires the specialized human presence to perform the test.

The new technology proposed in this article is to replace the traditional methodology, having as its objectives, having as several objectives, namely, to determine the start of cement setting, to register and analyse the resistivity in the whole process. This method may allow the quantification and determination of the hydration phases of any cement with any type of additions,

In this investigation, an electronic equipment called “Arduino” was used, composed of a resistivity sensor. At the beginning of the investigation, it was necessary to adjust the geometry factor of the test specimen, as well as the conditions related to the distance between electrodes and the intensity of the applied electric current

The use of different types of cements, namely three different types of classes, CEM 32.5, CEM 42.5 and CEM 52.5, the presence of additions, as well as different water/blinder ratios.

The investigation made it possible to evaluate a technology different from the traditional one, allowing more expeditious readings compared to the Vicat test, as well as allowing the use of additions and different Water/cement ratios as a more expeditious method in this type of work.

#### KEYWORDS:

Setting times, Resistivity, Cement, Addition

---

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Descrição da Dissertação .....	2
<b>2. ESTADO DO CONHECIMENTO</b> .....	<b>3</b>
2.1. Introdução.....	3
2.2. Pastas cimentícias.....	3
2.2.1. Cimento.....	3
2.2.2. Água.....	4
2.2.3. Adições.....	4
2.3. Processo de hidratação de pastas cimentícias.....	4
2.4. Tempo de presa e endurecimento .....	6
2.4.1. Ensaio para determinação dos tempos de presa de pastas cimentícias .....	7
2.4.2. Ensaio de Vicat .....	7
2.2.2.1 Vantagens e inconvenientes deste ensaio.....	9
2.4.3. Influência de adições minerais nos tempos de presa.....	9
2.5. Resistividade elétrica .....	10
2.5.1. Cimento endurecido.....	11
2.5.2. Pastas de cimento.....	13
2.6. Outros métodos.....	15
2.6.1. Ultrassons.....	15
2.7. Ensaio destrutivos.....	15
2.7.1. Ensaio de resistência à compressão .....	16
<b>3. Materiais e procedimentos de ensaio</b> .....	<b>17</b>
3.1. Cimentos .....	17
3.2. Cinzas volantes .....	18
3.3. Arduino .....	19
3.3.1. Sensores de temperatura e corrente elétrica.....	19
3.3.2. Programação do software Arduino .....	21

3.4. Fonte de alimentação .....	22
3.5. Circuito elétrico .....	23
3.6. Provedor de ensaio.....	24
3.6.1. Tensão elétrica DC a aplicar nos ensaios de resistividade elétrica .....	27
3.6.2. Distância entre eletrodos nos ensaios de resistividade elétrica .....	31
3.7. Obtenção da consistência normal das pastas de cimento para o ensaio de Vicat .....	35
3.8. Ensaio não destrutivo de resistividade para pastas de cimento endurecidas .....	37
3.9. Ensaios de impedância com corrente alternada .....	38
<b>4. Determinação experimental de tempos de presa de pastas cimentícias e de resistividade elétrica.....</b>	<b>39</b>
4.1. Ensaio de Vicat .....	39
4.2. Ensaio de resistividade de pastas endurecidas.....	39
4.3. Resistividade elétrica de pastas de cimento com corrente contínua .....	40
4.3.1. Pastas de cimento com consistência normal .....	40
4.3.2. Pastas de cimento com razão água ligante 0.5.....	48
4.3.3. Pastas de cimento com razão água ligante 0.35.....	56
4.4. Resistividade elétrica das pastas de cimento com corrente alternada .....	60
4.4.1. Pastas de cimento de consistência normal .....	60
4.4.2. Pastas de cimento com razão A/L 0.35.....	63
4.4.3. Pastas de cimento com razão A/L 0.5.....	66
4.4.4. Pastas de cimento com adições .....	69
4.5. Comparação dos tempos de presa do ensaio de Vicat com os ensaios de resistividade elétrica.....	73
<b>5. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA A DESENVOLVER .....</b>	<b>106</b>
5.1. Conclusões Gerais e trabalhos futuros a desenvolver .....	106
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Taxa de hidratação dos constituintes do cimento em função do tempo (adaptado de [5]) .	6
Figura 2.2 – Curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento Portland, durante a hidratação e a temperatura constante (adaptado de [15]) .....	7
Figura 2.3 - Aparelho de Vicat para a determinação da consistência da pasta normal e do tempo de presa (adaptado de [21]).....	8
Figura 2.4 –Evolução da hidratação de diferentes pastas de cimento ao longo do tempo (adaptado de [10]).....	9
Figura 2.5 – Forma da onda de uma corrente alternada (adaptado de [33]) .....	10
Figura 2.6 - Forma da onda de uma corrente contínua (adaptado de [33]) .....	11
Figura 2.7 – equipamento de medição - Sonda Wenner.....	12
Figura 2.8 - Exemplo do mecanismo de medição da resistividade elétrica .....	12
Figura 2.9 – Provete de ensaio da resistividade elétrica (adaptado de [29]) .....	13
Figura 2.10 - Diagrama elétrico esquemático para medição de resistividade elétrica das pastas de cimento (adaptado de [28]).....	14
Figura 2.11 – Exemplo da metodologia da intersecção de duas retas por regressão linear para se obter o início de presa de pastas de cimento (adaptado de [28]) .....	14
Figura 3.1 - Amplificador termopar ad8495.....	20
Figura 3.2 - Termopar tipo K.....	20
Figura 3.3 – Sensor de intensidade de corrente ina219 DC .....	20
Figura 3.4 - Calibração do sensor de temperatura .....	21
Figura 3.5 - Equação da reta dos pontos obtidos .....	22

Figura 3.6 - Código Arduino utilizado nos ensaios de resistividade elétrica .....	22
Figura 3.7 – Fonte de alimentação DC.....	23
Figura 3.8 – Representação esquemática do circuito elétrico dos ensaios de resistividade elétrica das pastas cimentícias.....	23
Figura 3.9 - Provete de ensaio de PVC .....	24
Figura 3.10 – Garrafa de plástico de 75 ml utilizada como provete de ensaio .....	25
Figura 3.11 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento num provete de plástico com uma tensão elétrica de 10V.....	25
Figura 3.12 – Provete de ensaio de XPS .....	26
Figura 3.13 - Provete de ensaio de acrílico .....	26
Figura 3.14 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 10V em XPS.....	27
Figura 3.15 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 10V em XPS.....	27
Figura 3.16 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 15V em XPS.....	28
Figura 3.17 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 15V em XPS.....	28
Figura 3.18 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V em XPS.....	29
Figura 3.19 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V em XPS.....	29

---

Figura 3.20 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V em XPS .....	30
Figura 3.21 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V em XPS .....	31
Figura 3.22 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V e um L de 50 mm em XPS .....	32
Figura 3.23 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V e um L de 50 mm em XPS .....	32
Figura 3.24 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 50 mm em XPS .....	33
Figura 3.25 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 50 mm em XPS .....	33
Figura 3.26 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 75 mm em XPS .....	34
Figura 3.27 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 75 mm em XPS .....	34
Figura 3.28 – Leitura da penetração de uma pasta de cimento para a obtenção da consistência normal .....	36
Figura 3.29 – Moldes metálicos para fabrico de provetes prismáticos.....	37
Figura 3.30 - Ensaio de espectroscopia de impedância usando corrente alternada .....	38
Figura 4.1 - Ensaio de resistividade elétrica dos cimentos CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N .....	40
Figura 4.2- Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	41

Figura 4.3 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	42
Figura 4.4 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	42
Figura 4.5 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	43
Figura 4.6 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	44
Figura 4.7 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	44
Figura 4.8 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM 42.5 com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	45
Figura 4.9 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	45
Figura 4.10 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	46
Figura 4.11 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	47
Figura 4.12 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica de 25V num molde de XPS .....	47
Figura 4.13 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	48
Figura 4.14 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	49

---

Figura 4.15 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	49
Figura 4.16 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	50
Figura 4.17 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	50
Figura 4.18 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	51
Figura 4.19 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	52
Figura 4.20 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	52
Figura 4.21 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	53
Figura 4.22 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	53
Figura 4.23 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	54
Figura 4.24 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico.....	54
Figura 4.25 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico .....	55
Figura 4.26 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	57

Figura 4.27 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.35 com uma tensão elétrica de 25V DC num molde de XPS.....	57
Figura 4.28 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	58
Figura 4.29 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.35 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	58
Figura 4.30 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS .....	59
Figura 4.31 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.35 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS.....	59
Figura 4.32 – Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS.....	60
Figura 4.33 – Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS.....	61
Figura 4.34 – Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e corrente alternada em XPS.....	61
Figura 4.35 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e corrente alternada em XPS .....	62
Figura 4.36 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS.....	62
Figura 4.37 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS .....	63
Figura 4.38 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS.....	64

---

Figura 4.39 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS .....	64
Figura 4.40 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS .....	65
Figura 4.41 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS .....	66
Figura 4.42 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS.....	66
Figura 4.43 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS .....	67
Figura 4.44 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS.....	67
Figura 4.45 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS .....	68
Figura 4.46 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS .....	69
Figura 4.47 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS.....	69
Figura 4.48 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 25% de CV e A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS.....	70
Figura 4.49 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 25% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS.....	71
Figura 4.50 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 50% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS.....	72

Figura 4.51 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 50% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS.....	72
Figura 4.52 - Correlação dos tempos de inícios de presa entre o método de Vicat e o método de impedância que mede a resistividade elétrica com corrente alternada .....	74
Figura 4.53 - Correlação dos resultados dos tempos de início de presa do método de Vicat com o método expedito aplicado corrente contínua num molde de XPS.....	75
Figura 4.54 - Correlação do método de Vicat com o método de expedito desenvolvido aplicando corrente contínua num molde de acrílico .....	75

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Constituintes do cimento CEM II/A-L 42.5 R.....	17
Tabela 3.2 - Constituintes do cimento CEM II/B-L 32.5 N.....	18
Tabela 3.3 - Constituintes do cimento CEM I 52.5 N .....	18
Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de Vicat .....	39
Tabela 4.2 – Tempos de início de presa dos ensaios realizados para as pastas CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N com consistência normal.....	73

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A	– Ampere;
AC	– corrente alternada;
A/L	– água/ligante;
CM	– materiais constituintes;
CV	– cinzas volantes;
CaO	– óxido de cálcio;
DC	– corrente contínua;
K	– clínquer;
$K_2O$	– óxido de potássio;
L	– calcário;
MgO	– óxido de magnésio;
$Na_2O$	– óxido de sódio;
$SO_3$	– trióxido de enxofre;
$TiO_2$	– dióxido de titânio;
V	– Volt;

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Nos dias atuais a tecnologia afirma-se a uma velocidade enorme e em todas as áreas, nomeadamente na construção. As tecnologias inovadoras proporcionam novas metodologias com mais eficácia no resultado perante o objetivo atingir.

Na construção, o uso do cimento é fundamental para construirmos infraestruturas, nesse sentido é importante conhecermos toda a informação e estudos que existem sobre este material. A medição do início e fim de presa é efetuada por intermédio de métodos empíricos tradicionais, pela metodologia “Vicat”, em que exige a presença humana para realizar o ensaio. Contudo, este método é pouco viável uma vez que requer quantidades significativas de material para teste, difíceis de processar em laboratório.

Posto isto, surgiu a necessidade de encontrar outras formas de avaliar os tempos de presa de pastas cimentícias, recorrendo ao uso de corrente elétrica como uma possível forma de se obter tempos de presa das pastas de cimento. Para tal, aplicou-se uma dada corrente elétrica às amostras e com isto conseguiu-se obter valores de resistividade elétrica, que se correlacionam com a evolução da hidratação das pastas de cimento.

Numa primeira fase, foi necessário averiguar o tamanho dos provetes a submeter a ensaio, isto é, as dimensões dos elétrodos e a distância entre elétrodos. Após isso, foi necessário averiguar qual seria a intensidade de corrente contínua a utilizar de forma a se obterem resultados de ensaios consistentes que se possam extrair conclusões. Por fim, averiguou-se se a corrente contínua, primeira opção dos ensaios realizados, é a melhor escolha face à corrente alternada.

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste em avaliar os parâmetros que afetam a resistividade elétrica de pastas de cimento, através de variações da relação de água / ligante e o uso de cinzas

volantes, através do equipamento ARDUINO, plataforma prototipagem eletrónico de hardware livre, desenvolvido para medir a intensidade de corrente elétrica, que atravessa a prova de ensaio, para assim se obter os tempos de presa das misturas cimentícias. Foi feita uma análise dos resultados obtidos e estes são comparados com os ensaios de Vicat para assim se avaliar a possibilidade do uso deste método aplicando corrente contínua.

Um segundo objetivo passa por avaliar a veracidade do uso de corrente alternada de forma a que haja uma comparação de resultados entre as correntes AC e DC e concluir qual é a mais indicada para este tipo de ensaios.

### **1.3. Descrição da Dissertação**

De forma a organizar a dissertação, esta foi dividida em 5 capítulos, onde são apresentados os seguintes conteúdos:

- Capítulo 1 – Este capítulo serve para apresentar os temas e os objetivos da dissertação, assim como o enquadramento da situação que instigou ao desenvolvimento da mesma;
- Capítulo 2 – Estado de conhecimento. Nesse capítulo são abordados vários estudos e ensaios de especialistas sobre a medição do tempo de presa usando a resistividade elétrica.
- Capítulo 3 – No terceiro capítulo são descritos os materiais utilizados na produção das misturas cimentícias pretendidas e os métodos aplicados para a produção e caracterização das mesmas ao longo das diversas fases do estudo.
- Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados os estudos dos ensaios efetuados e os resultados obtidos.
- Capítulo 5 – o último capítulo apresenta as conclusões retiradas, devidamente fundamentadas, da elaboração deste estudo bem como possíveis perspetivas para futuros desenvolvimentos

## **2. ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo será feita uma abordagem teórica sobre os temas que serão discutidos na tese e que são necessários para explicar alguns fenômenos que decorreram ao longo deste estudo experimental. Desta forma, falar-se-á sobre o processo de hidratação bem como as várias fases que aí ocorrem, ensaio tradicional que mede os tempos de presa e a influencia de uso de adições no processo de hidratação. Serão abordados métodos que usam corrente elétrica para medir tempos de presa e, deste modo será feita uma breve explicação sobre o tema resistividade elétrica.

### **2.2. Pastas cimentícias**

As pastas cimentícias, é um produto que resulta da mistura de um ligante com um agregado e água. Às pastas cimentícias podem adicionar-se adições que irão favorecer determinadas características das pastas.

#### **2.2.1. Cimento**

O cimento é um ligante que ganha presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso e areia. O cimento é um tipo de ligante hidráulico, que quando misturado com água, ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação [14].

De acordo com a NP EN 197-1:2001 [1] “o cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico firmemente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade debaixo de água”.

O cimento Portland é um ligante hidráulico, o que significa que, para além de endurecer ao ar, também endurece dentro de água, tendo ainda capacidade de manter a resistência ao longo do tempo nos dois ambientes. Esta característica tornou o cimento Portland num ligante de elevada utilização, tendo substituído o papel que as cais tinham anteriormente.

A característica mais importante do cimento é a classe de resistência que apresenta aos 28 dias. Na designação dos cimentos é fornecida a informação da sua resistência aos 28 dias, por exemplo, o

cimento Portland de calcário CEM II/A-L 42,5 R indica que este cimento apresenta uma resistência aos 28 dias de 42.5 MPa.[11]

### 2.2.2. Água

Os ligantes e os agregados são componentes essenciais na constituição das argamassas, mas a água é também um elemento indispensável para a produção de argamassas. A função principal da água é a de garantir a capacidade aglutinante dos vários constituintes das argamassas no estado fresco, de forma a conferir a consistência necessária à sua aplicação. A quantidade de água de amassadura a ser utilizada na execução de argamassas tem um papel fundamental na qualidade destas, mais precisamente a razão entre a quantidade de água e ligante, pois esta relação vai influenciar as características mecânicas e físicas das argamassas [12].

### 2.2.3. Adições

A NP EN 206-1:2007 – Betão – Parte 1 – Especificação, desempenho, produção e conformidade [13] – define que uma adição é um “material finamente utilizado no betão com a finalidade de lhe melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais”. Aquela norma considera dois tipos de adições inorgânicas:

- i) Adições quase inertes (tipo I);
- ii) Adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (tipo II).

O filler e os pigmentos são adições do tipo I, sendo as restantes do tipo II. De acordo com a NP EN 206-1:2007, utilização de adições na produção de betão só é permitida se essa adição cumprir com os requisitos especificados na respetiva norma. Assim, os filleres devem ser conformes com a NP EN 1260 [17], as cinzas volantes com a NP EN 450 [18], a sílica de fumo com a NP EN 13263 [19] e a escória granulada de alto forno com a NP EN 15167 [20].

## 2.3. Processo de hidratação de pastas cimentícias

A hidratação das pastas cimentícias ocorre devido a reações químicas entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro. Estão presentes mecanismos de hidratação, em que estes se dividem em duas fases: Numa primeira fase, sucede uma dissolução-precipitação, onde se dá a dissolução dos compostos anidros e há uma formação dos hidratos na solução, que por sua vez, devido

à sua baixa permeabilidade, sucede a precipitação dos produtos hidratados; Numa segunda fase, há uma hidratação no estado líquido do cimento, em que as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro, sem que nestes haja solução [16].

A mistura de cimento, pó muito fino, com água forma uma pasta, cujo endurecimento resulta de reações químicas dos seus constituintes com a água, as quais vão dar origem a um material sólido com resistência mecânica, a pasta de cimento hidratada. Em contacto com a água, os silicatos e aluminatos que constituem o cimento reagem com a água, dando origem a novos compostos estáveis, que cristalizam sob a forma de agulha que, emaranhando-se e ligando-se entre si, conferem resistência ao conjunto. O mecanismo de presa e de endurecimento do cimento Portland foi explicado pela primeira vez em 1887 por Henry Le Chatelier na sua tese de doutoramento, seguindo um esquema semelhante ao que tinha sido adotado por Lavoisier em 1765, para explicar a presa e o endurecimento do gesso de construção. Le Chatelier refere que a resistência do cimento está associada a:

- i) Fenómeno químico de hidratação;
- ii) Fenómeno físico de cristalização;
- iii) Fenómeno físico-químico da passagem ao estado sólido por meio de criação de ligações entre diferentes cristais que conferem coesão ao sólido [2].

No processo da hidratação, os grãos de cimento, que de início se encontravam em suspensão, vão se aglutinando uns aos outros em resultado da floculação entretanto ocorrida, formando uma imbricada malha de cristais que vão promover a construção de um “esqueleto” sólido, responsável pela estabilidade estrutural da pasta [2]. Assim, com o decurso do processo, a pasta vai endurecendo progressivamente e adquirindo as propriedades físicas, mecânicas e químicas da pasta de cimento endurecida. Os fenómenos associados ao processo da presa e do endurecimento são muito complexos continuando a ser objeto de investigação, em particular, pelos químicos. Para alguns dos fenómenos existem ainda várias teorias, não sendo, portanto, ainda clara a sua explicação. Durante a hidratação do cimento ocorre uma sequência de reações químicas formando-se diversos compostos intermédios que vão novamente reagindo entre si.

As velocidades de hidratação dos constituintes do cimento são bastante distintas, como é possível observar na Figura 2.1, que representa a taxa de hidratação (relação entre a massa hidratada e a total)

dos constituintes do clínquer em função do tempo. Os constituintes que mais rapidamente hidratam são o  $C_4AF$  e o  $C_3A$ .

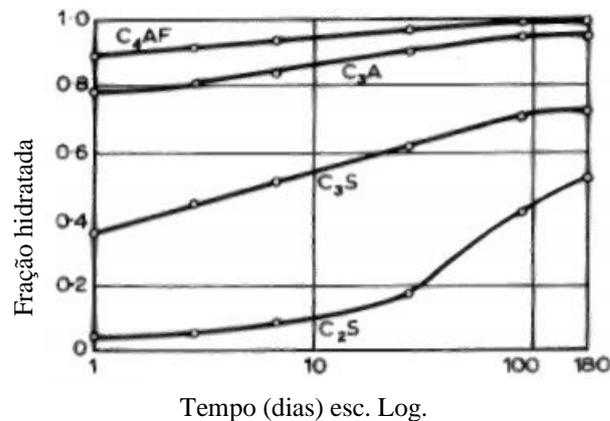


Figura 2.1 – Taxa de hidratação dos constituintes do cimento em função do tempo (adaptado de [5])

A passagem do estado plástico ao sólido é lenta e contínua, sendo difícil de estabelecer o momento em que se considera que ocorreu a presa. O fenômeno de presa será explicado no subcapítulo 2.4. Para avaliar o efeito da presa nas pastas, utilizam-se ensaios experimentais que, de acordo com procedimentos normalizados, permitem avaliar os tempos de início e fim de presa.

## 2.4. Tempo de presa e endurecimento

O fenômeno de presa relativamente à hidratação do cimento, é a passagem do estado líquido para o estado sólido, a passagem de uma pasta trabalhável para uma não trabalhável. É de uma enorme dificuldade determinar o instante em que ocorre essa alteração, pois esta sofre inúmeras gradações até atingir o estado sólido.

Tem-se tentado definir o princípio da presa por diferentes métodos, como através da variação da condutibilidade elétrica, da viscosidade e do desenvolvimento de calor, etc. Mas as dificuldades experimentais são bastante maiores do que o método imaginado há mais de um século pelo inventor do cimento Portland, Louis Vicat.

Com o objetivo de assegurar a trabalhabilidade dos betões após a sua produção, durante períodos de tempo que garantam o seu adequado transporte e colocação em obra, a NP EN 197-1:2001 [1] impõe para os cimentos apresentem tempos de início de presa superiores a 45 minutos, no caso dos cimentos de maior resistência (50 MPa), e de 60 ou 75 minutos, para os cimentos de resistência inferior (35 MPa e 45 MPa). Após a fase de presa, o processo de endurecimento prolonga-se no tempo traduzindo-se no aumento da rigidez e da resistência mecânica da pasta de cimento em resultado do desenvolvimento das reações químicas, que se processam de forma contínua ao longo do tempo, até que ocorra a paragem das reações. A velocidade de endurecimento decresce com o tempo tendendo para zero. A pasta de cimento desenvolve calor, em particular durante a presa e o início de endurecimento. As reações de hidratação são exotérmicas e se medir o calor de hidratação ao longo das fases, a temperatura constante, obtém-se curvas do tipo da figura 2.2 [15]

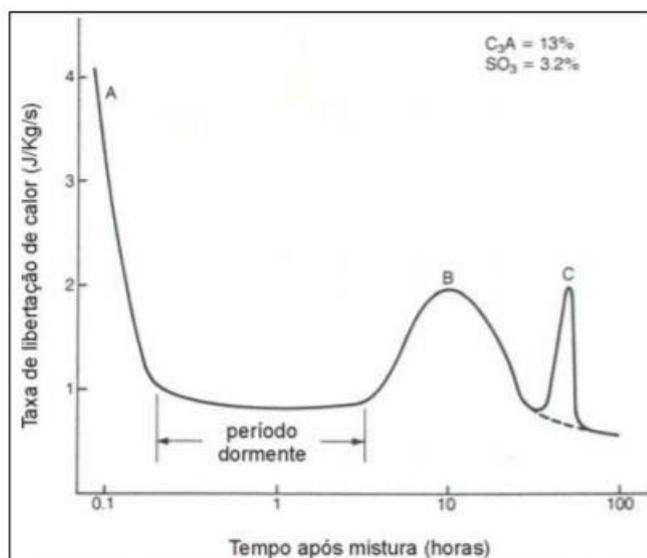


Figura 2.2 – Curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento Portland, durante a hidratação e a temperatura constante (adaptado de [15])

#### 2.4.1. Ensaio para determinação dos tempos de presa de pastas cimentícias

#### 2.4.2. Ensaio de Vicat

O fenómeno de presa entende-se pela passagem do estado líquido ao sólido, que por outras palavras corresponde à rigidificação da pasta de cimento. Distinguem-se dois períodos para o tempo de presa:

Início e fim. O início de presa traduz-se como sendo o tempo que decorre desde a fabricação da amassadura até se dar a sua perda de plasticidade, enquanto que o fim de presa corresponde ao período em que a pasta necessita para possuir uma consistência que consiga suportar uma determinada pressão.

É utilizada a agulha de Vicat para se medir o início e o fim de presa de cimentos de consistência normal, este ensaio está descrito na norma NP EN 196-3 [13], o aparelho é constituído por um recipiente tronco-cônico, com 40 mm de altura e um diâmetro inferior de 70 mm, que se preenche com uma pasta de cimento de consistência normalizada. Esta pasta deverá ser preparada com uma quantidade de água que garanta que a penetração de uma agulha com 10 mm de diâmetro seja  $6 \pm 1$  mm. Sobre a pasta, no interior do recipiente tronco-cônico, é deixada cair, de forma quase estática, uma agulha circular com  $1,0 \text{ mm}^2$  de secção sobre a qual atua uma massa de 300g. O tempo de início de presa corresponde ao instante em que a agulha deixa de atravessar toda a pasta, ficando entre 4 a 6 mm do fundo do recipiente. Este resultado relaciona-se com o tempo disponível em obra para a colocação de um betão no interior das cofragens em condições de trabalhabilidade adequada, não devendo nunca ser inferior a uma hora. O tempo de fim de presa corresponde ao tempo, medido a partir da adição da água ao cimento, em que a agulha passa a penetrar na pasta pelo menos 0,5 mm. Nesta situação utiliza-se uma agulha semelhante, com  $1,0 \text{ mm}^2$  de secção, à qual é acoplado um anel com 5 mm de diâmetro posicionado 0,5 mm acima da extremidade da agulha. Quando a penetração da agulha é superior a 0,5 mm, o anel imprime uma marca na superfície da pasta. Sob o ponto de vista prático, o tempo de fim de presa corresponde ao tempo a partir do qual um betão é considerado um material sólido. Na figura 2.3 é possível observar o aparelho de Vicat, bem como a agulha e sonda e, também, um ensaio em curso.

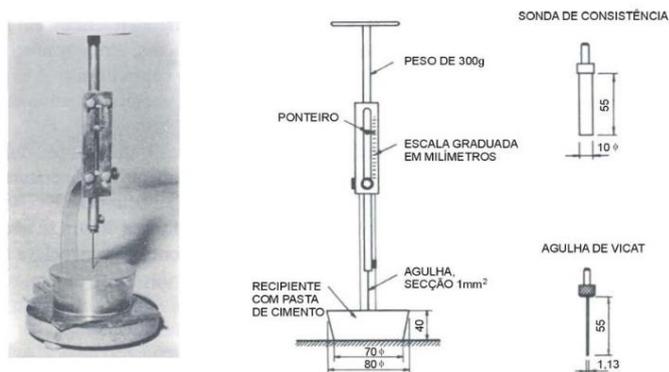


Figura 2.3 - Aparelho de Vicat para a determinação da consistência da pasta normal e do tempo de presa (adaptado de [21])

### 2.2.2.1 Vantagens e inconvenientes deste ensaio

O ensaio de Vicat é um ensaio empírico cujos resultados se relacionam com os tempos de presa. No entanto, o ensaio é meramente tecnológico, não sendo suportado por nenhuma evidência científica e, além disso, é usado para avaliar a conformidade de cimentos, não sendo aplicável a pastas com presença de adições nem adjuvantes e não permite ter em consideração a relação água/ligante das pastas. Para além disso, o ensaio não é aplicável nem a argamassas nem a betões e daí a necessidade de desenvolver e validar um ensaio expedito que possa, no futuro, ser aplicado a pastas, argamassas e betões.

### 2.4.3. Influência de adições minerais nos tempos de presa

Num estudo científico [10], foi analisado a evolução do calor libertado durante a hidratação em pastas de cimento com o uso de adições e sem adições figura 2.4. Comprovando que, o calor de hidratação diminui consideravelmente usando CV quando comparado com pastas de cimento sem adições, aumentando assim o tempo de presa de pastas de cimento com CV.

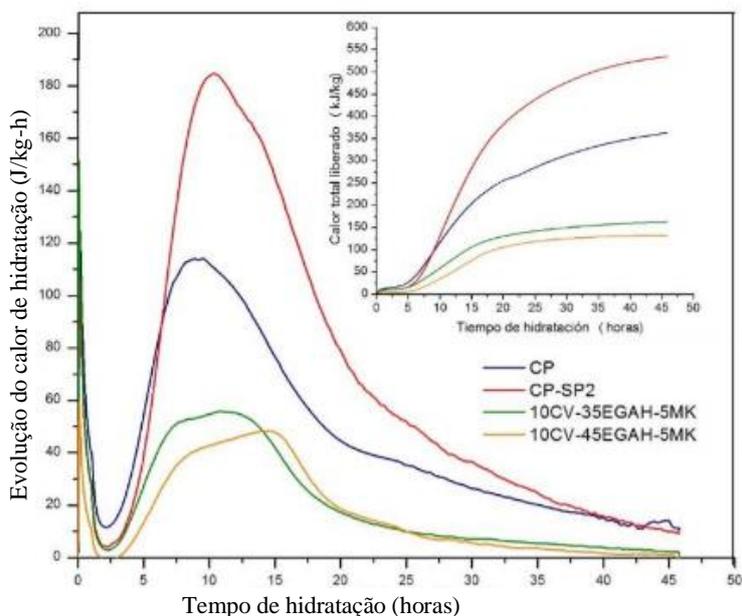


Figura 2.4 –Evolução da hidratação de diferentes pastas de cimento ao longo do tempo (adaptado de [10])

Um dos aspetos menos favoráveis das adições nas pastas de cimento é que a CV provoca uma redução da trabalhabilidade, devido ao facto de as partículas das CV possuírem dimensões reduzidas e consequentemente têm maior área superficial e, portanto, a demanda de água para elaborar uma mistura aumenta [10].

## 2.5. Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é uma grandeza física que indica a capacidade dos materiais para se oporem ao fluxo de corrente elétrica. A resistividade é inversamente proporcional ao fluxo de corrente que existe na amostra. A unidade da resistividade é ohm-metro ( $\Omega.m$ ). Existem dois tipos de corrente que podem ser aplicadas para se medir a resistividade elétrica, a corrente alternada e a corrente contínua. A corrente alternada é uma corrente elétrica que varia com o tempo, enquanto que na corrente contínua o sentido permanece constante no tempo podendo provocar efeitos de polarização, esse efeito induz a polarização dos elétrodos, que possam provocar erros significativos nos resultados pretendidos. A corrente alternada é constituída por fases, contrariamente à corrente contínua que é constituída pelo polo positivo e polo negativo [33].

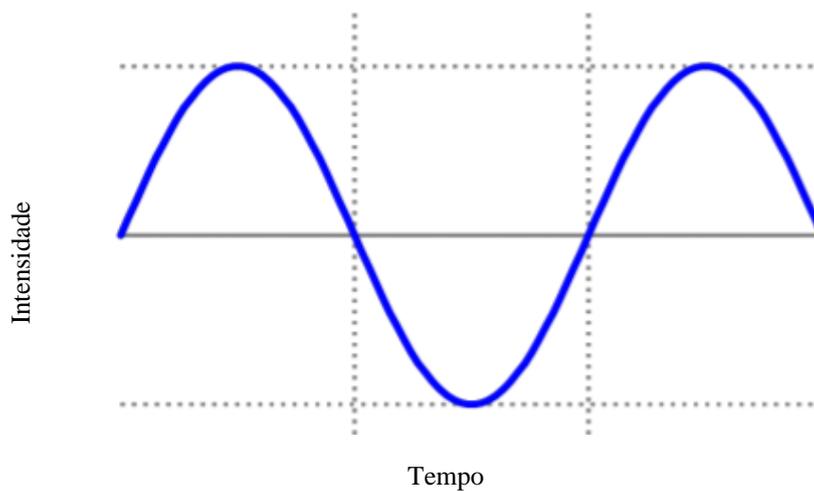


Figura 2.5 – Forma da onda de uma corrente alternada (adaptado de [33])



Figura 2.6 - Forma da onda de uma corrente contínua (adaptado de [33])

Existem vários fatores que influenciam a resistividade elétrica tais como o tipo de ligante, a razão água/ligante e a natureza química da solução intersticial. No caso de uma argamassa húmida, com mais poros, bem como maior ou menor tortuosidade da rede porosa a resistividade reduz-se. Para uma humidade relativa constante e em condições estacionárias, a resistividade aumenta para uma menor relação água/ligante.

A resistividade elétrica pode ser calculada através da lei de Ohm que está expressa na seguinte equação:

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad [1.1]$$

Onde:

- $\rho$  – Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ )
- L - Afastamento entre elétrodos (m)
- V - Diferença de potencial (V)
- I - Intensidade de corrente (A)
- A – Área dos elétrodos

### 2.5.1. Cimento endurecido

O uso de resistividade elétrica em pastas de cimento/argamassas endurecidas é um indicador da resistência dessas amostras bem como um possível indicador de maior ou menor número de vazios e fissuras. Quanto maior for a resistividade elétrica de uma amostra maior resistência apresenta pois

indica-nos que existe uma maior dificuldade dos iões da água atravessarem a amostra. Para a realização destes ensaios é utilizado a técnica dos quatro elétrodos através da uma Sonda Wenner, este método também é um bom indicador para avaliar a corrosão das armaduras em estruturas de betão armado, comprovando a sua durabilidade. Para além disso, esta é uma técnica de ensaio de baixo custo, não destrutiva, de fácil aplicação e rápida resposta. [22].

O dispositivo que permite realizar esses ensaios está ilustrado na figura 2.7 e o respetivo exemplo do mecanismo da medição na figura 2.8.



Figura 2.7 – equipamento de medição - Sonda Wenner

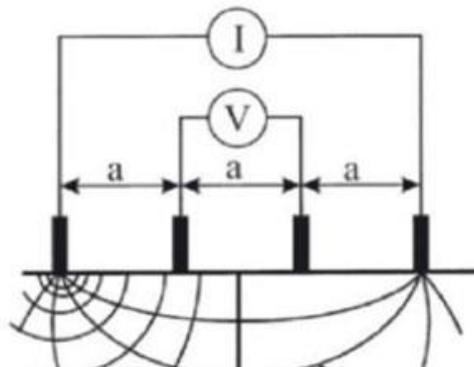


Figura 2.8 - Exemplo do mecanismo de medição da resistividade elétrica

O equipamento regista a resistividade elétrica através da aplicação de uma corrente DC entre os dois elétrodos das extremidades e a diferença de potencial é medida entre os dois elétrodos internos. A corrente é transportada pelos iões do poro da estrutura.

### 2.5.2. Pastas de cimento

A água evaporável que está presente nos poros capilares das misturas cimentícias apresenta íons de cálcio, sulfatos, hidroxilas, cátions de sódio e potássio que possibilitam a condução da eletricidade no interior das pastas de cimento [25]. Durante a hidratação das pastas de cimento, a água livre e os íons dissolvidos influenciam a variação das propriedades elétricas diminuindo a facilidade de propagação à medida que a hidratação do cimento avança [26].

A relação entre a resistividade elétrica e os tempos de presa das pastas de cimento já foi alvo de estudo por Zongjin em 2007, que desenvolveu um equipamento utilizando o princípio do transformador em um sensor sem contacto com as pastas, permitindo eliminar problemas de contacto com os elétrodos. A sua construção foi patenteada e requer um gerador capaz de produzir corrente alternada com frequência de 1000Hz.

De acordo com Calado [28], para medição do tempo de início de presa, foi desenvolvida uma metodologia própria de estabelecer por regressão linear duas retas, uma para cada trecho do gráfico de evolução da resistividade elétrica medida ao longo de ensaio, desde o início da mistura dos constituintes. O tempo de início de presa foi assumido como sendo o correspondente à interseção das duas retas [27]. Calado [28] também demonstrou uma correlação da evolução da resistividade elétrica com o tempo de presa das pastas de cimento. Neste estudo foi utilizado um provete cilíndrico com chapas metálicas que serviram de elétrodos (figura 2.9) e foi aplicado corrente contínua. Em ambos os estudos, a resistividade elétrica foi calculada através da lei de Ohm.



Figura 2.9 – Provette de ensaio da resistividade elétrica (adaptado de [29])

A prova de ensaio desenvolvida por Calado consiste numa ligação em série do provete de ensaio com uma bateria de 12V e um multímetro digital que serviu para realizar as medições da corrente elétrica que atravessava a pasta de cimento no decorrer dos ensaios (figura 2.10).

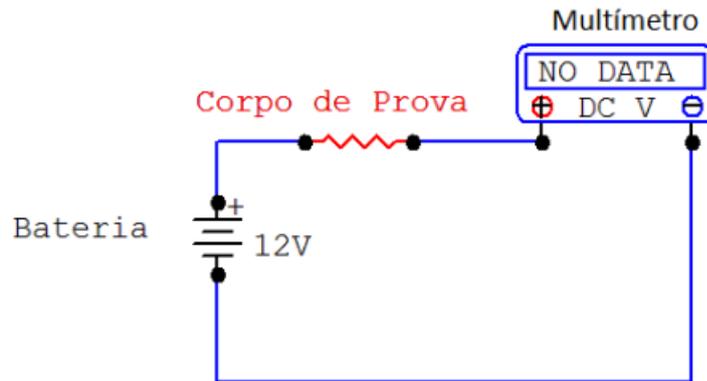


Figura 2.10 - Diagrama elétrico esquemático para medição de resistividade elétrica das pastas de cimento (adaptado de [28])

O ensaio acima exposto (figura 2.10) permitiu medir valores de resistividade elétrica das pastas de cimento ensaiadas e, com isto, determinar os valores de início de presa. Para tal, neste estudo foi aplicada uma metodologia que consiste no estabelecimento de duas retas por regressão linear em que a intersecção das duas retas representa o valor do início de presa da pasta de cimento que está a ser testada (figura 2.11).

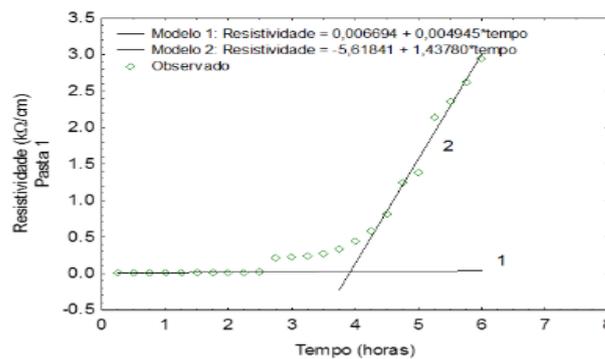


Figura 2.11 – Exemplo da metodologia da intersecção de duas retas por regressão linear para se obter o início de presa de pastas de cimento (adaptado de [28])

## **2.6. Outros métodos**

### **2.6.1. Ultrassons**

A medição da velocidade de propagação das ondas de ultrassons pode ser utilizada para determinar a uniformidade do betão, a presença de vazios ou fendas, variações das propriedades com o tempo e as propriedades dinâmicas [23].

Segundo Naik et al [24] a utilização do método do ultrassom pode ser utilizado para controlar a qualidade dos materiais, de forma a poder avaliar o estado de deterioração. Este método mede a velocidade de propagação das ondas de ultrassons, podendo aferir a existência de fendas ou vazios, bem como as propriedades dinâmicas. Também pode ser aplicado para estimar a resistência do betão.

Com este método é possível fazer ensaios não destrutivos e avaliar várias vezes uma amostra de betão, o que torna útil pois pode-se controlar o betão ao longo do tempo e estimar as suas mudanças estruturais internas.

Geralmente os equipamentos de medição comerciais seguem o princípio subjacente na norma NP EN 12504-4 2007 [23] que passa pelo seguinte raciocínio: existe um transdutor eletroacústico (emissor) em contacto com a superfície do betão a ensaiar que produz um conjunto de ondas longitudinais. Após ter percorrido um comprimento conhecido de betão, o conjunto de ondas é convertido em sinal elétrico por um segundo transdutor (recetor), sendo então medido, com um relógio eletrónico, o tempo de percurso. A frequência natural dos transdutores deverá estar normalmente dentro da gama de 20 KHz a 150 KHz.

## **2.7. Ensaio destrutivos**

Uma outra forma de se poder avaliar a qualidade do cimento/betão é realizar ensaios destrutivos de compressão no estado endurecido, pois uma resistência elevada significa que é um bom material.

Segundo Coutinho [30] a rotura pode ser entendida sob três aspetos principais:

- a) Separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos;
- b) Carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa;
- c) Estado de deformação ou fissuração de tal modo excessivo que o material já não é utilizável.

### 2.7.1. Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão do cimento deve ser avaliada de acordo com a especificação NP EN 196-1 – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas [19]. A resistência de um cimento é estabelecida com base no ensaio à compressão de uma argamassa de composição normalizada, correntemente designada por argamassa normal, aos 28 dias de idade.

Existem alguns fatores que influenciam a tensão que leva a rotura de um provete submetido a uma força de compressão simples, podem ser relativos ao material, isto é, a razão água/cimento, a resistência dos agregados, o tipo de ligante, a idade e as condições de cura. Além disso, as condições de ensaio também é um fator influenciador, como por exemplo, a dimensão e a forma do provete, a velocidade de carga e outras características da prensa [31].

Martins et al [32] mencionam que o valor da resistência à compressão é tanto maior quanto menor for a razão água/cimento, isto é, quanto mais cimento existir numa mistura maior será a sua resistência à compressão.

### 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Um dos principais objetivos deste estudo experimental passou por conceber um método para avaliar a resistividade elétrica e construir um molde eficaz para “acolher” as diferentes pastas que serão testadas. Fez-se uso do *software* Arduino trata-se de uma plataforma de fácil uso, que facilita a recolha de dados e permite uma monitorização quase contínua. A técnica utilizada foi a técnica dos dois elétrodos, esta técnica permite a utilização de dois tipos de corrente: corrente alternada e corrente contínua. De forma a dar continuidade ao estudo elaborado por Calado [28], decidiu-se aplicar corrente contínua neste estudo e averiguar se os efeitos de polarização associados a este tipo de corrente eram, ou não, um fator preponderante nos resultados dos ensaios.

#### 3.1. Cimentos

Para a dissertação foram utilizadas três classes de cimento diferentes nas misturas cimentícias: O cimento Portland CEM II/A-L 42.5 R e os seus constituintes estão representados na tabela 3.1. O cimento CEM II/B-L 32.5 N caracterizado na tabela 3.2 e o cimento Portland CEM I 52.5 N caracterizado na tabela 3.3.

Tabela 3.1 – Constituintes do cimento CEM II/A-L 42.5 R

Constituintes	(%)
K	80-94
L	6-20
CM	0-5

**Legenda:** K- Clínquer; L – Calcário; CM - Materiais constituintes.

Tabela 3.2 - Constituintes do cimento CEM II/B-L 32.5 N

---

Constituintes	(%)
K	65-79
L	21-35
CM	0-5

---

**Legenda:** K- Clínquer; L – Calcário; CM - Materiais constituintes.

Tabela 3.3 - Constituintes do cimento CEM I 52.5 N

---

Constituintes	(%)
K	95-100
CM	0-5

---

**Legenda:** K- Clínquer; CM - Materiais constituintes.

### 3.2. Cinzas volantes

As cinzas volantes são resíduos das centrais termoelétricas a carvão recolhidas dos gases de combustão através de filtros eletrostáticos ou de mangas. As cinzas, que constituem a parte não combustível do carvão, são constituídas por partículas esféricas de pequena dimensão, com diâmetro 10  $\mu$ m [2], dimensões compreendidas entre 1 e 100  $\mu$ m e valores de superfície específica de 250 a 600 m<sup>2</sup>/kg [5].

As cinzas volantes possuem reatividade pozolânica. Embora dependa do tipo de carvão, as cinzas são fundamentalmente constituídas por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em que 60 a 90 % da sílica se encontra na forma vítrea (não cristalina). As cinzas volantes contêm um certo teor de carbono, usualmente designado por teor de inqueimados, que é avaliado pelo ensaio de perda de fogo. De acordo com NP EN 197-1:2001 [1], as cinzas volantes para poderem ser utilizadas como constituinte de cimentos têm de apresentar valores de perda ao fogo inferior a 5 % (ou 7% num tipo de cinza de menor qualidade).

De forma a avaliar o efeito que as adições provocam no tempo de presa de pastas cimentícias foi utilizado cinzas volantes (CV) nas pastas. As cinzas volantes, apresentam um baixo teor de cálcio.

### **3.3. Arduino**

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrónica de hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída. O Arduino permite a integração de todos os componentes e programação pelos autores. As leituras são autónomas, cabendo ao operador a produção da mistura a ser ensaiada, preenchimento do molde e ligação do molde à rede elétrica de AC ou DC, libertando-o para realização de outras tarefas.

#### **3.3.1. Sensores de temperatura e corrente elétrica**

O Arduino está conectado a dois sensores, um sensor de temperatura e outro de intensidade de corrente. O sensor de temperatura é composto por um amplificador termopar ad8495 que amplifica e converte, através do software Arduino, o valor elétrico em temperatura. Por sua vez, este está conectado a um termopar tipo K que lê os respetivos valores elétricos e os transmite ao amplificador. Estes dois sensores estão ilustrados nas Figs. 3.1 e 3.2. O sensor de corrente contínua (figura 3.3) é denominado por ina219 DC e este consegue medir intensidades de corrente elétrica com uma tensão elétrica máxima de 28 V.



Figura 3.1 - Amplificador termopar ad8495



Figura 3.2 - Termopar tipo K



Figura 3.3 – Sensor de intensidade de corrente ina219 DC

### 3.3.2. Programação do software Arduino

O programa foi desenvolvido na plataforma Arduino com a finalidade de proceder à leitura e à aquisição dos dados nos sensores de temperatura e de resistividade. Para obter a temperatura foi utilizado um sensor termopar do tipo K. Para que o Arduino conseguisse ler a temperatura neste sensor foi ainda usado um amplificador de sinal. Além disso, foi necessário, ainda, proceder à calibração deste sensor. A calibração consistiu na medição da temperatura com o sensor em três recipientes com água à temperatura de 24°C, 31°C e 37°C. Com o output do sensor em Volts construiu-se um gráfico com a temperatura dos recipientes e as respectivas leituras em Volts (figura 3.4). Com estes três pontos foi possível traçar uma reta e desta forma obter a sua equação que por sua vez foi usada no software, para converter os Volts na temperatura real medida pelo sensor.

Como já foi referido no início deste capítulo, a programação do Arduino foi feita para um sensor de intensidade de corrente contínua de forma a dar continuidade ao estudo elaborado por Calado [28] e, poder avaliar se os efeitos de polarização são, ou não, importantes para este tipo de ensaios.

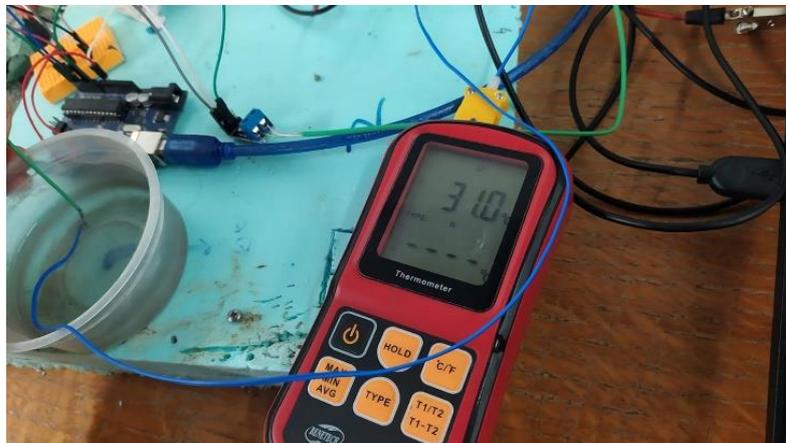


Figura 3.4 - Calibração do sensor de temperatura

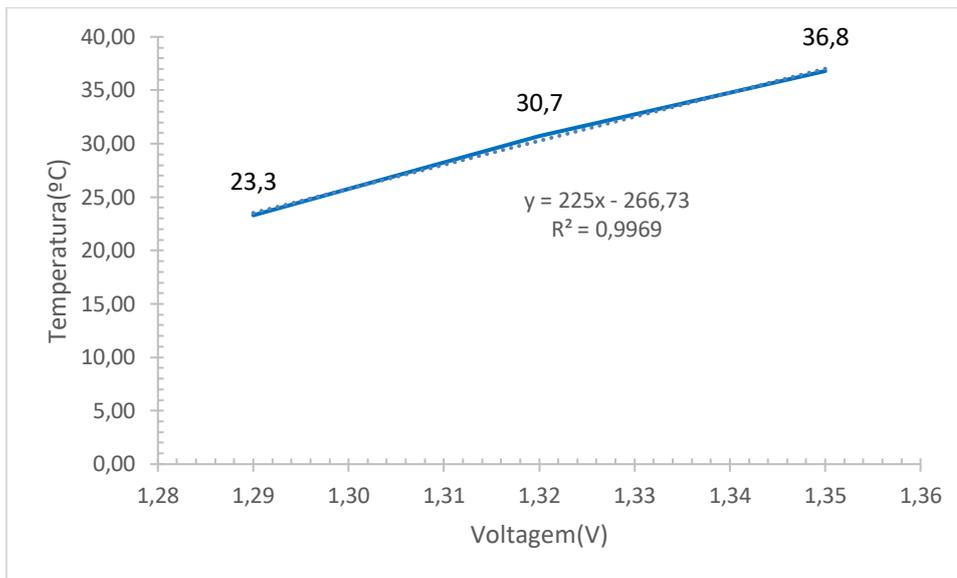


Figura 3.5 - Equação da reta dos pontos obtidos

```

ina219_e_termino_par_6
}

void loop(void)
{
  float busVoltage = 0;
  float current = 0;
  float power = 0;

  busVoltage = sensor219.getBusVoltage_V();
  current = sensor219.getCurrent_mA();
  power = busVoltage * (current/1000); // Calculate the Power

  int raw = analogRead(A1); // ler entrada analógica
  float Vout = raw * (5.0 / 1023.0) * 176.76 - 212.14; // calcular a voltagem na saída AD8495
  float temp = (Vout); // converte para temperatura com

  Serial.print(current);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(temp);
}

```

Figura 3.6 - Código Arduino utilizado nos ensaios de resistividade elétrica

### 3.4. Fonte de alimentação

Na realização dos ensaios é necessária uma fonte de alimentação que fornece corrente contínua ao circuito de modo a se poder medir a intensidade de corrente ao longo dos ensaios. Para tal, utilizou-se

uma fonte de alimentação da marca “BK PRECISION” como está ilustrado na figura 3.7. A fonte de alimentação permite a alimentar o circuito com corrente contínua, permitindo registar as medidas em tempo real, através do software “Tera Term”.

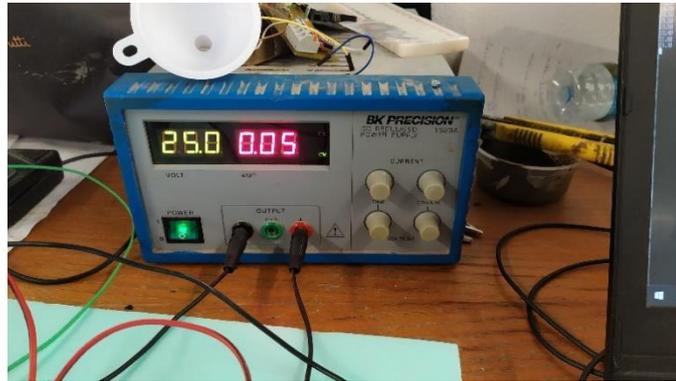


Figura 3.7 – Fonte de alimentação DC

### 3.5. Circuito elétrico

A prova dos ensaios está ligada em série com o equipamento elaborado, mais precisamente o sensor de corrente elétrica e uma fonte de alimentação de corrente contínua como se pode observar na figura 3.8.

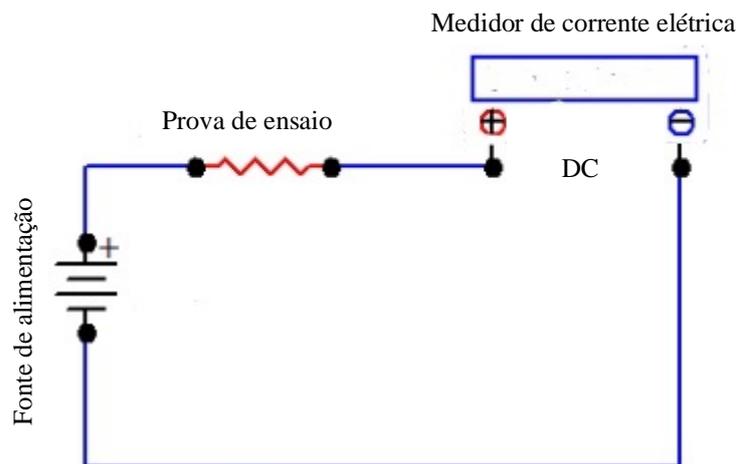


Figura 3.8 – Representação esquemática do circuito elétrico dos ensaios de resistividade elétrica das pastas cimentícias

### 3.6. Provede de ensaio

Numa primeira fase idealizou-se que, o provede dos ensaios iria ser como está ilustrado na figura 3.9, num tubo PVC com 11.7 cm de comprimento e nas extremidades estariam os elétrodos de inox com 57.5mm de diâmetro. Este primeiro provede de ensaio foi construído com base no trabalho desenvolvido por Calado [28], em que as dimensões do provede são similares. Fez-se uma série de ensaios no provede descrito e constatou-se que não seria a melhor solução devido à área dos elétrodos ser demasiada grande tornando os ensaios impraticáveis pois a mistura cimentícia aquecia em demasia provocando obrigatoriamente uma aceleração nos tempos de presa.



Figura 3.9 - Provede de ensaio de PVC

Numa segunda fase, os ensaios foram realizados em garrafas de plástico de 75 ml (figura 3.10) como está ilustrado na figura 3.9. Esta solução surgiu da necessidade de baixar a área dos elétrodos de forma a poder ter ensaios mais precisos. De facto, para além de se conseguir ensaiar as pastas sem interrupções, obtiveram-se resultados, mas muito aquém do pretendido, conforme mostra a figura 3.11.



Figura 3.10 – Garrafa de plástico de 75 ml utilizada como provete de ensaio

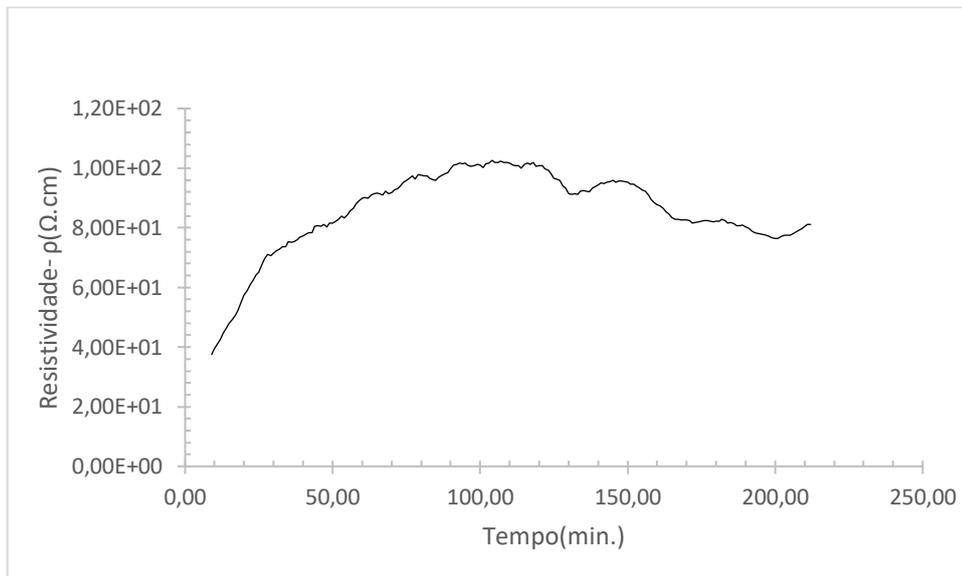


Figura 3.11 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento num provete de plástico com uma tensão elétrica de 10V

A terceira dimensão de provetes de ensaio testada foi a ilustrada na figura 3.12. Em relação à anterior, houve uma diminuição da área dos eléctrodos e uma diminuição da distância dos eléctrodos, sendo este de cobre (bons condutores). O material que “acolheu” as pastas de cimento foi o poliestireno extrudido mais conhecido por XPS. Foi escolhido este material porque apresenta uma baixa condutibilidade térmica, não absorve água e não é um material que possui condutibilidade elétrica. Este provete tem

como dimensões 25mm de comprimento, 13.5mm de profundidade e 7.1mm de largura. Os elétrodos de cobre apresentam como dimensões 7.1mm de largura e 15mm de altura.



Figura 3.12 – Provete de ensaio de XPS

Por fim, o acrílico foi o material escolhido para a última prova de ensaio, de forma a ter-se uma variedade no tipo de material em que se irá colocar as várias pastas de cimento, aferindo assim, a influência dos mesmos nos ensaios (figura 3.13). Além disso, este material apresenta baixa condutibilidade térmica, baixa condutibilidade elétrica e absorve apenas 2% da humidade. As dimensões deste provete são 25mm de comprimento, 13.5mm de profundidade e 6.8mm de largura. Os elétrodos de cobre têm como dimensões 15mm de altura e 7.1mm de largura



Figura 3.13 - Provete de ensaio de acrílico

### 3.6.1. Tensão elétrica DC a aplicar nos ensaios de resistividade elétrica

Para uma melhor compreensão do desenvolvimento e aplicabilidade da tensão elétrica nos ensaios de medição dos tempos de presa, foram efetuados vários testes com diferentes tensões elétricas de forma a obter-se a tensão elétrica apropriada à realização dos ensaios de medição de presa das pastas de cimento. Para tal, realizou-se uma série de ensaios com uma gama de intervalos de tensões elétricas de [10V a 25V] DC.

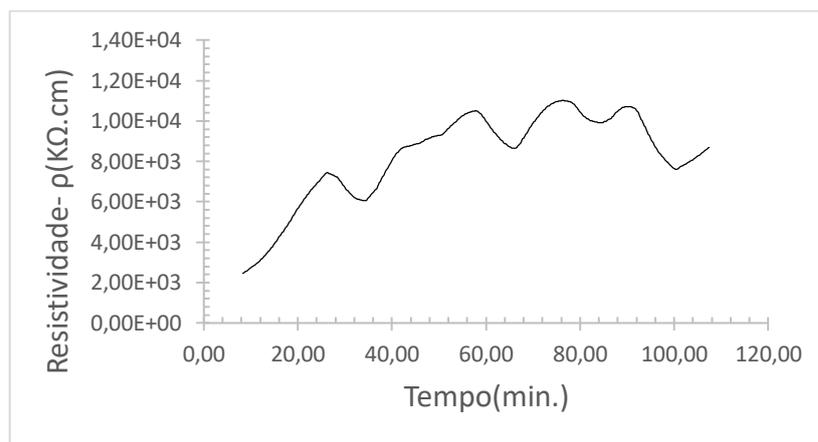


Figura 3.14 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 10V em XPS

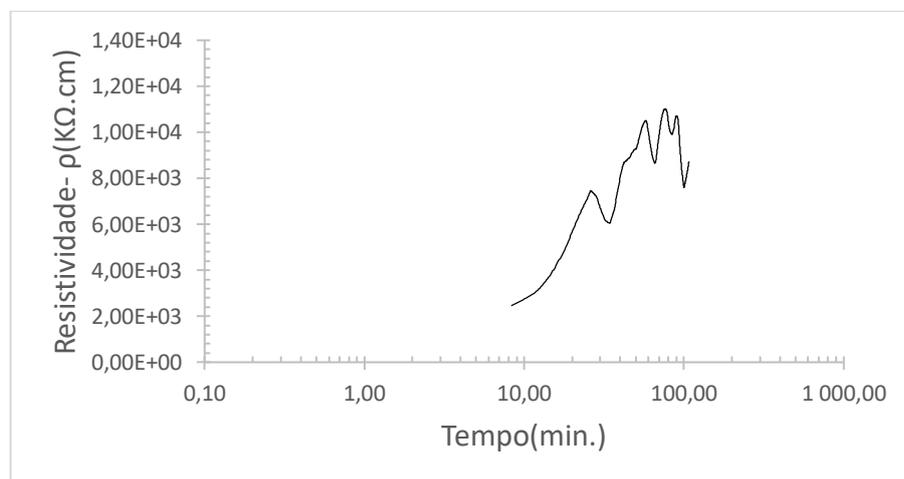


Figura 3.15 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 10V em XPS

Deste ensaio conclui-se que, a tensão aplicada não permitiu obter uma curva em que se pudesse determinar o tempo de presa, tal se confirma quando se transforma o resultado original (figura 3.14) num em que as ordenas são de base logarítmica figura(3.14). Quando olhamos para a figura 3.15 não se consegue definir duas curvas “limpas” em que se possa traçar duas retas por regressão linear, por isso, é difícil determinar com aproximação o tempo de início de presa deste ensaio. A este fato deve-se à corrente elétrica aplicada ser baixa, desta forma conclui-se que, para este tipo de ensaio, isto é, para a distância entre os elétrodos adotado e para a área dos mesmos, a tensão aplicada não permitia obter um gráfico com a precisão pretendida. Desta forma, no ensaio seguinte aumentou-se o valor da tensão elétrica DC para 15V.

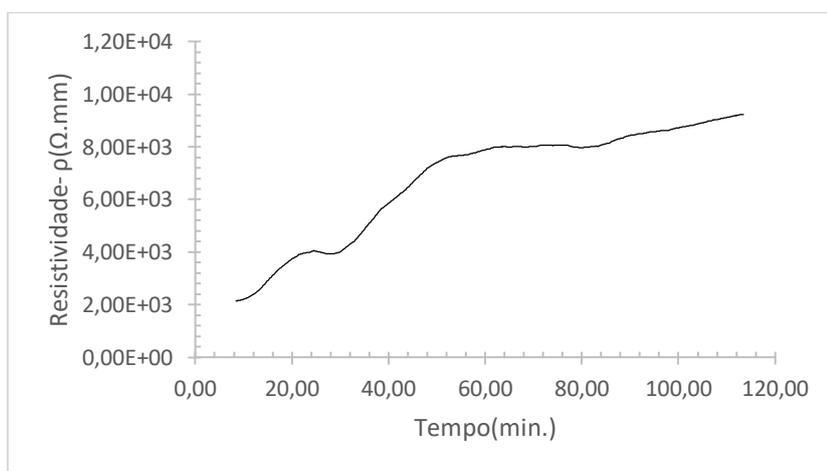


Figura 3.16 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 15V em XPS

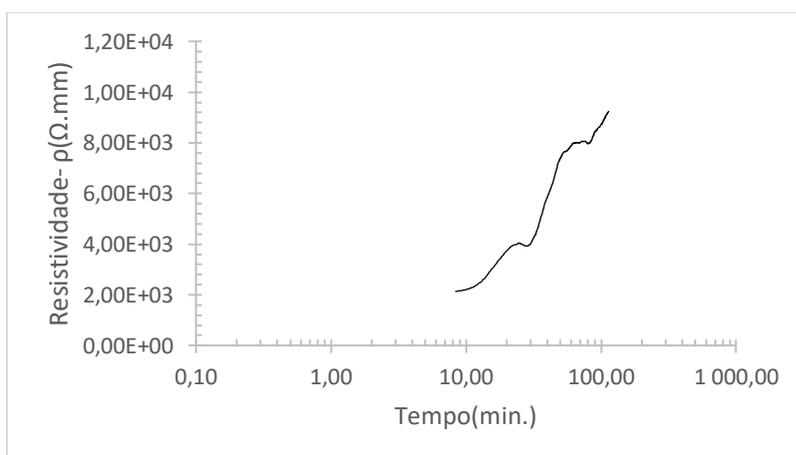


Figura 3.17 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 15V em XPS

Na figura 3.17 verifica-se um aumento da precisão do ensaio comparativamente ao anterior (figura 3.15). Mas mesmo assim, longe do ideal e do idealizado. Deste modo, prosseguiu-se com o aumento da corrente elétrica, impondo-se no próximo ensaio uma tensão elétrica DC de 20V.

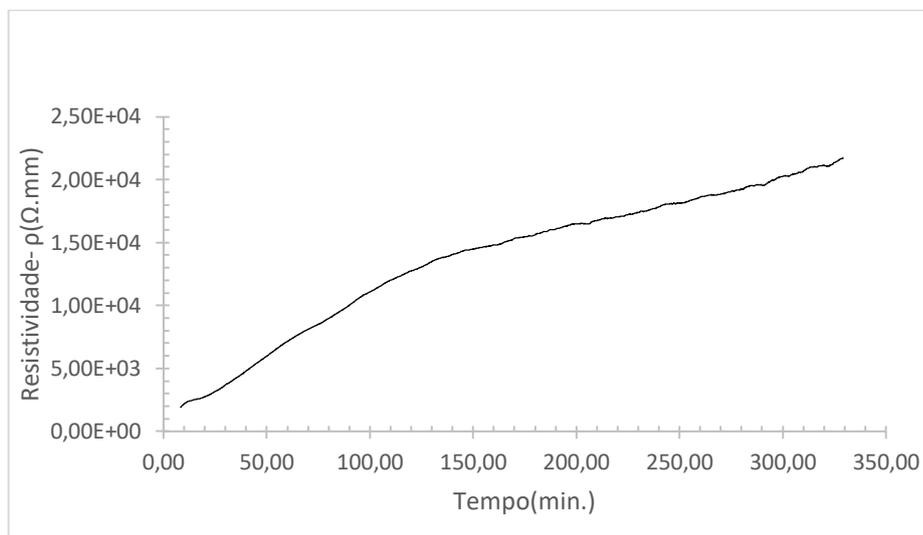


Figura 3.18 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V em XPS

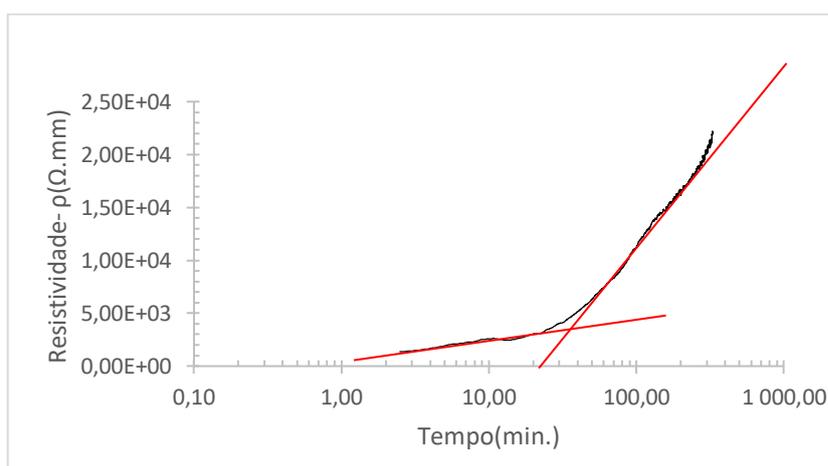


Figura 3.19 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V em XPS

Nas condições em que a pasta de cimento foi ensaiada, constatou-se que, aplicando uma tensão elétrica de 20V obtém-se o resultado pretendido. Se transformarmos o eixo do tempo para valores algorítmicos, obtém-se uma curva que permite obter o início de presa da pasta cimentícia (figura 3.19). Para obter o valor do início de presa é feita uma intersecção das retas obtidas por regressão linear como está exemplificado na figura 3.19. O objetivo nesta fase do projeto consiste em aperfeiçoar o método de ensaio, por isso, não foi determinado o início de presa deste ensaio.

Por fim, o último ensaio desta fase do projeto consistiu em aumentar o valor da tensão elétrica para 25V, valor próximo do máximo que o sensor elétrico consegue ler valores de intensidade de corrente. O resultado do ensaio está ilustrado na figura 3.20 e 3.21.

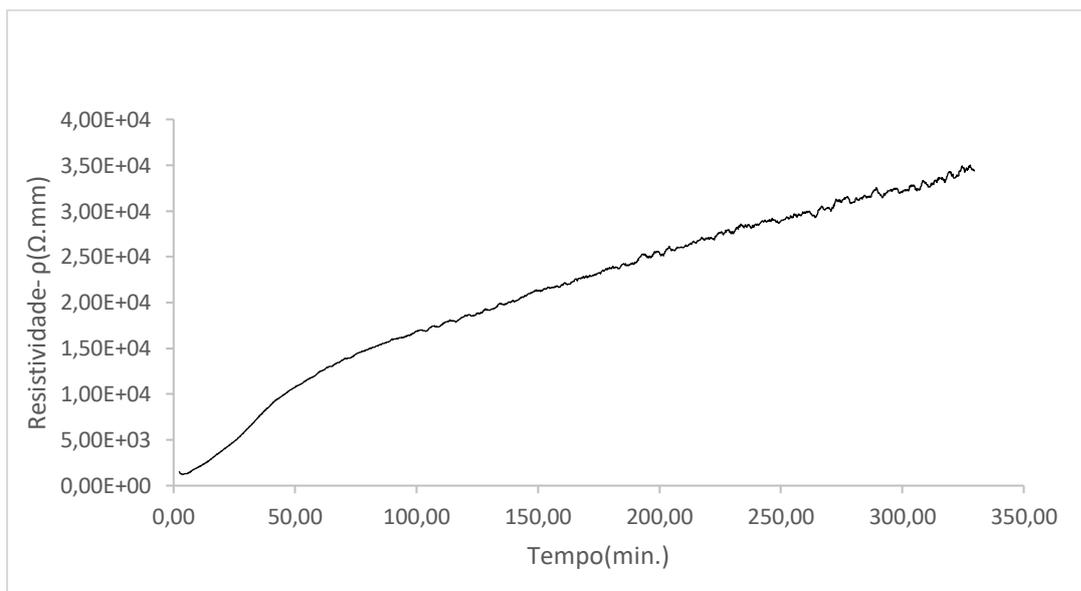


Figura 3.20 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V em XPS

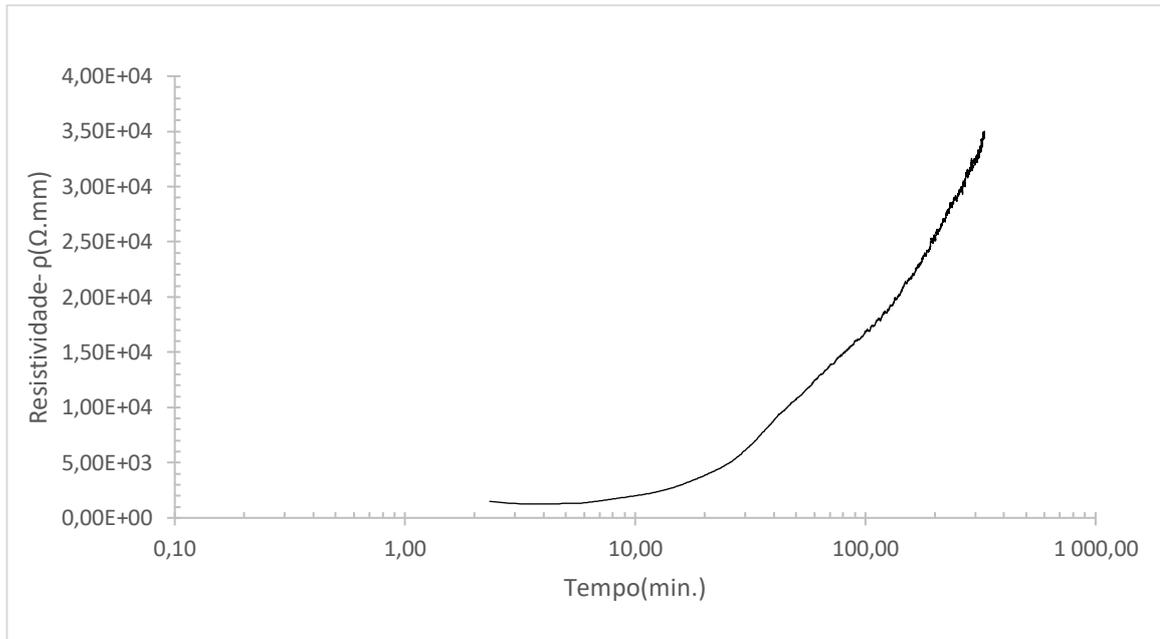


Figura 3.21 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V em XPS

O objetivo deste subcapítulo é encontrar as tensões elétricas DC mais apropriadas para as condições de ensaio impostas. As conclusões que se retiram é que as tensões elétricas DC de 20V e 25V são as que apresentaram resultados desejados para que se possam obter inícios de presa das pastas de cimento que serão ensaiadas.

### 3.6.2. Distância entre elétrodos nos ensaios de resistividade elétrica

Depois de averiguar qual seria a melhor tensão elétrica a aplicar nos ensaios, houve necessidade de saber qual seria a distância correta entre elétrodos. Para tal, aumentou-se a distância usada nos ensaios de calibração da tensão elétrica de 25 mm para 50 mm.

No primeiro ensaio usou-se uma tensão de 20 Volts DC e, em jeito de comparação, fez-se posteriormente outro ensaio com 25 Volts DC, visto serem as tensões mais adequadas para um  $L=25$  mm.

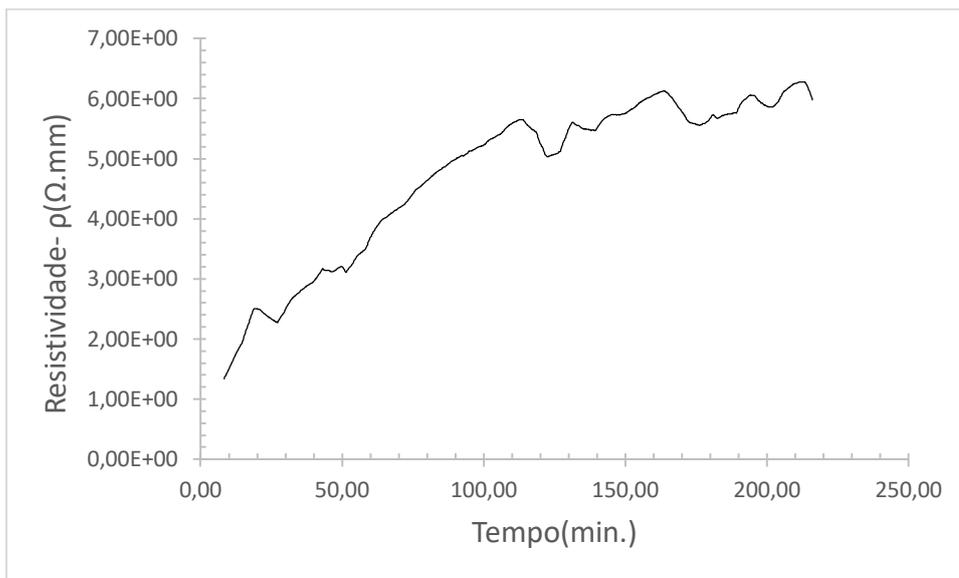


Figura 3.22 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V e um L de 50 mm em XPS

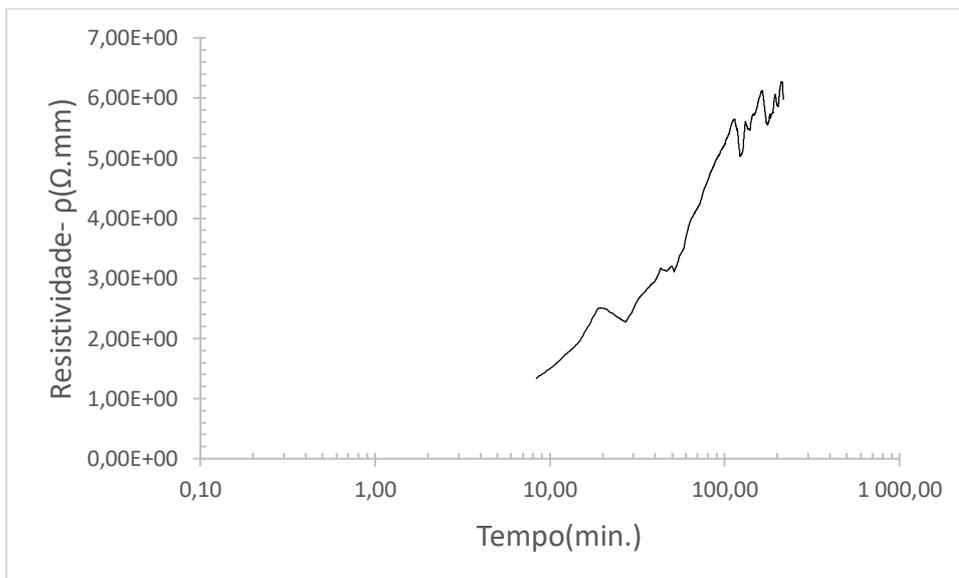


Figura 3.23 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 20V e um L de 50 mm em XPS

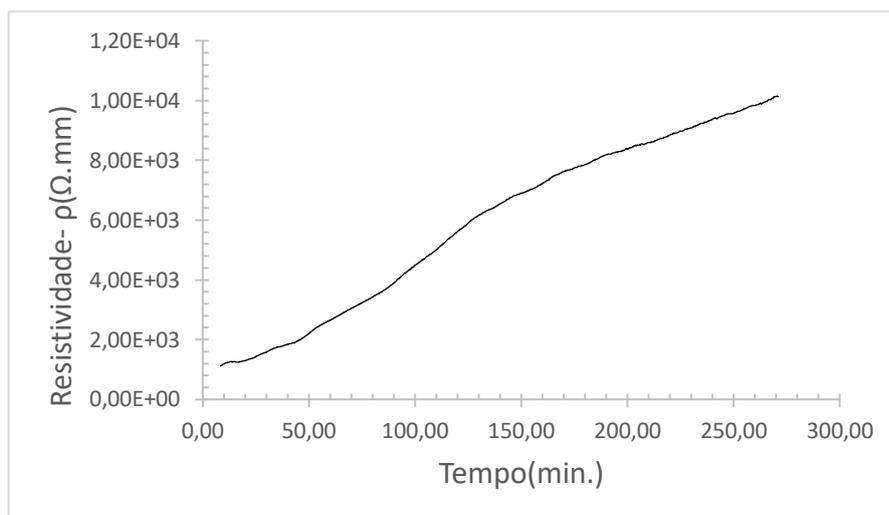


Figura 3.24 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 50 mm em XPS

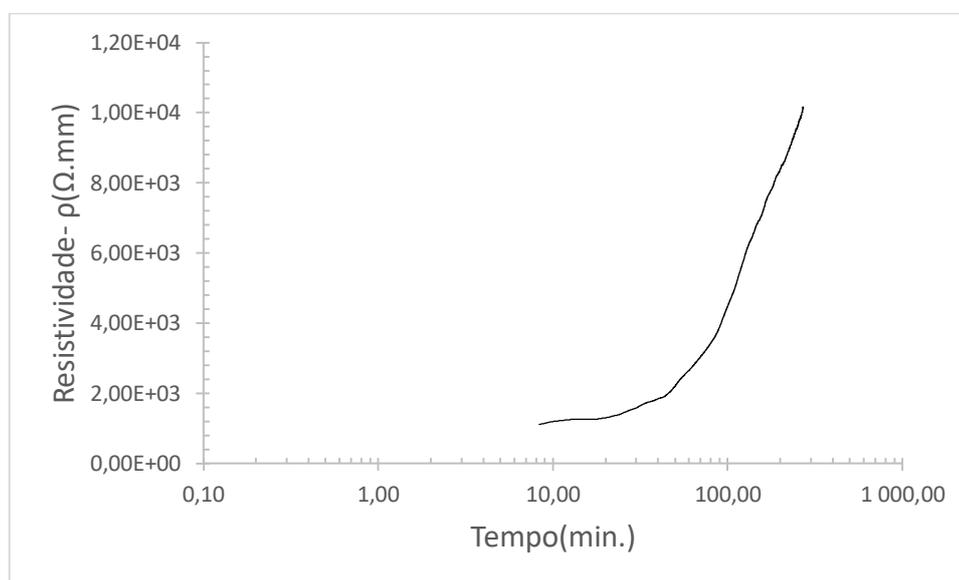


Figura 3.25 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 50 mm em XPS

Destes dois ensaios conclui-se que, a precisão do ensaio com 25V é maior do que a de 20V, de fato se compararmos a figura 3.23 com a figura 3.25 conclui-se que a última apresenta resultados que possibilitam traçar duas retas por regressão linear de uma forma mais precisa possibilitando a obtenção de um valor de início de presa mais preciso. A isto deve-se ao fato de que quanto maior for a distância entre elétrodos mais intensidade de corrente DC será necessário aplicar para que se obtenha a precisão pretendida e, para este caso em concreto, para um L=50 mm os 20V não são adequados. Já os 25V mostraram ser suficientes para se obter uma curva precisa.

De forma a averiguar até que ponto os 25V serão viáveis, o distanciamento aplicado aos elétrodos no próximo ensaio terá um L=75mm.

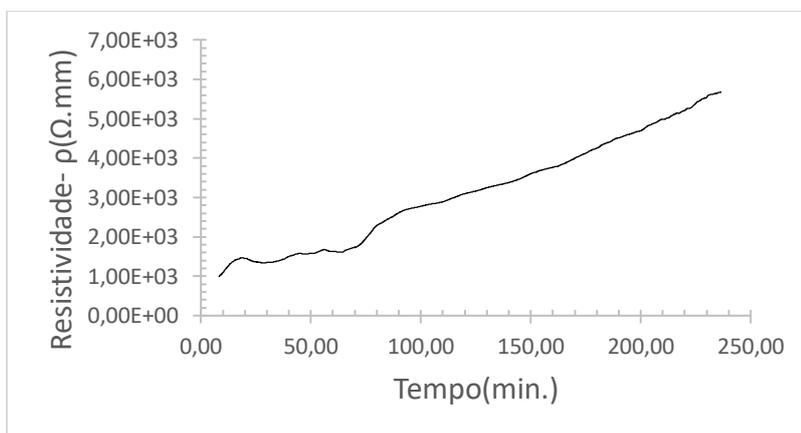


Figura 3.26 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 75 mm em XPS

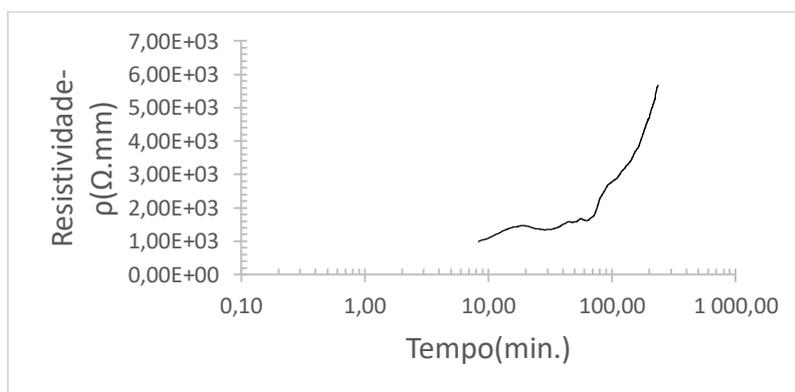


Figura 3.27 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento com uma tensão elétrica DC de 25V e um L de 75 mm em XPS

Se compararmos o ensaio da figura 3.25 com o ensaio da figura 3.27, corrobora-se a teoria de que quanto maior for a distância entre elétrodos mais intensidade de corrente elétrica será necessária aplicar para que se obtenha uma curva adequada pois o último ensaio foi menos preciso. De facto, se quisermos traçar duas retas por regressão linear neste último ensaio (figura 3.28), o procedimento seria mais difícil pela característica do resultado do ensaio. Em suma, os fatores distância entre elétrodos e intensidade de corrente são diretamente proporcionais.

### **3.7. Obtenção da consistência normal das pastas de cimento para o ensaio de Vicat**

A água necessária para uma tal pasta é determinada por sucessivos ensaios de penetração em pastas com quantidades de água diferentes usando a norma específica para tal [13]. A massa total das partes móveis deve ser de  $(300 \pm 1)$  g. O molde de Vicat destinado a conter a pasta durante o ensaio deve ser de borracha dura, plástico ou latão.

O procedimento de ensaio estipula os seguintes passos:

- 1) Colocar a água e o cimento no recipiente cuidadosamente, para evitar qualquer perda de água ou de cimento; a duração desta operação não deve ultrapassar 10 s;
- 2) Pôr imediatamente o misturador a funcionar a velocidade lenta, começando a medir os tempos das etapas de mistura. Além disso, registar o tempo com aproximação ao minuto como “tempo zero”;
- 3) Ao fim de 90 s parar a máquina 30 s, durante os quais toda a pasta aderente às paredes e ao fundo do recipiente deve ser retirada com um raspador de borracha ou plástico e reposta no centro do recipiente;
- 4) Voltar a pôr a máquina em andamento a velocidade lenta por um novo período de 90 s. O tempo total de funcionamento do misturador deve ser de 3 min;

- 5) Introduzir imediatamente a pasta no molde ligeiramente oleado, colocado previamente numa placa de base de vidro ligeiramente oleada, e enchê-lo até ter um ligeiro excesso sem compactação nem vibração excessivas;
- 6) Eliminar quaisquer vazios na pasta batendo no topo do molde cheio, suavemente, com a palma da mão;
- 7) Baixar a sonda com cuidado até que esta entre em contacto com a pasta. Fazer uma pausa de 1 s a 2 s nesta posição, de modo a evitar uma velocidade inicial ou uma aceleração forçada das partes móveis. Soltar então rapidamente as partes móveis;
- 8) Efetuar a leitura da escala pelo menos 5 s depois do fim da penetração ou 30 s depois da libertação da sonda, conforme um ou outro destes limites de tempo ocorra primeiro (distância entre a face inferior da sonda e a placa de base);
- 9) Repetir o ensaio com pastas de teores de água diferentes, até se encontrar uma que conduza a uma distância de  $(6 \pm 2)$  mm entre a sonda e a placa de base.



Figura 3.28 – Leitura da penetração de uma pasta de cimento para a obtenção da consistência normal

### 3.8. Ensaio não destrutivo de resistividade para pastas de cimento endurecidas

Para a realização dos ensaios não destrutivos de resistividade foi necessário produzir provetes prismáticos usando moldes metálicos disponíveis no Laboratório de Engenharia Civil (figura 3.29). As dimensões destes moldes são de 40 mm de altura, 40 mm de largura e 160 mm de comprimento. O procedimento para a realização dos mesmos foi o seguinte:

1. Pincelaram-se as paredes internas do molde com óleo desmoldante;
2. Colocaram-se pastas de cimento nos respetivos moldes e identificou-se cada um dos moldes de modo a saber a que tipo de cimento correspondem;
3. Fez-se a vibração dos moldes através de uma placa vibratória de modo a reduzir os vazios presentes nas pastas;
4. Os moldes foram colocados numa câmara com humidade e temperatura controlada durante a secagem.



Figura 3.29 – Moldes metálicos para fabrico de provetes prismáticos

### 3.9. Ensaios de impedância com corrente alternada

Devido aos efeitos de polarização que se registaram, principalmente, nas pastas de consistência normal, foi necessário averiguar se o uso de corrente alternada nos ensaios de resistividade elétrica era a opção mais apropriada para medir tempos de início de presa de pastas cimentícias.

Para tal, foi possível aceder às instalações do IPVC de Viana do Castelo para se realizar ensaios de espectroscopia de impedância que permitiu avaliar a evolução da hidratação das várias misturas ensaiadas. No ajustamento e interpretação dos espectros experimentais utilizou-se um programa computacional específico ISA ("Impedance Spectroscopy Analysis"). A impedância considerada para a evolução do tempo de hidratação foi extraída separadamente caso a caso, isto é, em cada ensaio foram usadas diferentes frequências para extrair os resultados dos ensaios. Essa gama de frequências foi dos 10Hz aos 10000Hz e usando um sinal de amplitude reduzida (0,25 V).

A espectroscopia de impedância (EI) fornece informações relevantes sobre a evolução microestrutural, uma vez que é sensível a variações nas proporções volumétricas relativas das fases granulares e da solução/ produtos de reação na região intergranular, as suas composições, natureza e concentração de iões em solução [34].

Estão representadas na figura 3.30 duas amostras a serem testadas simultaneamente usando o método da espectroscopia de impedância.

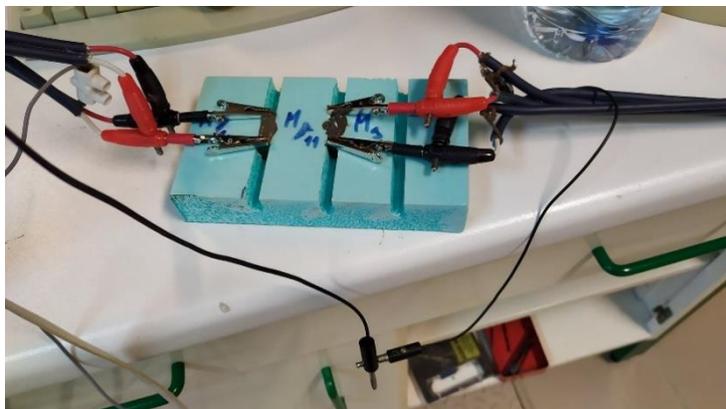


Figura 3.30 - Ensaios de espectroscopia de impedância usando corrente alternada

#### 4. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE TEMPOS DE PRESA DE PASTAS CIMENTÍCIAS E DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Neste capítulo, encontram-se resultados de tempos de presa de diferentes pastas de cimento para três ensaios diferentes (Ensaio de Vicat, ensaio de resistividade elétrica aplicando DC e ensaio de espectro tropia por impedância aplicando AC), fazendo uma comparação dos valores obtidos e posteriormente uma avaliação da correlação de resultados do Ensaio “padrão” que é o ensaio de Vicat com os outros dois. Também foi feita o ensaio da Resistividade elétrica de pastas endurecidas ao longo de vários dias.

##### 4.1. Ensaio de Vicat

O ensaio de Vicat é importante para determinar o tempo do início e do fim de presa das pastas de cimento. De acordo com a norma NP EN 196-3: 2006 [13], existe um procedimento normalizado para a realização deste tipo de ensaio. No estudo em concreto, adotou-se a metodologia referida na norma anterior. Os resultados do ensaio das três pastas de cimento estão expostos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de Vicat

---

	CEM II/B-L 32.5 N	CEM II/A-L 42.5 R	CEM I 52.5 N
Início de presa (min)	244	140	205
Fim de presa (min)	281	192	235

---

##### 4.2. Ensaio de resistividade de pastas endurecidas

Para se poder avaliar a resistividade dos cimentos em estudo ao longo da fase de solidificação, foram feitos ensaios diários utilizando a sonda de Wenner, até aos 17 dias. Os três moldes de pasta cimentícia foram realizados utilizando os cimentos CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N com

consistência normal. Durante todo o processo, os moldes, de dimensões de (40 × 40 × 160 mm), estiveram colocados dentro de água de forma a mantê-los húmidos, permitindo assim a passagem dos iões livres no decorrer dos ensaios.

Posto isto, os resultados desse ensaio estão ilustrados na figura 4.1.

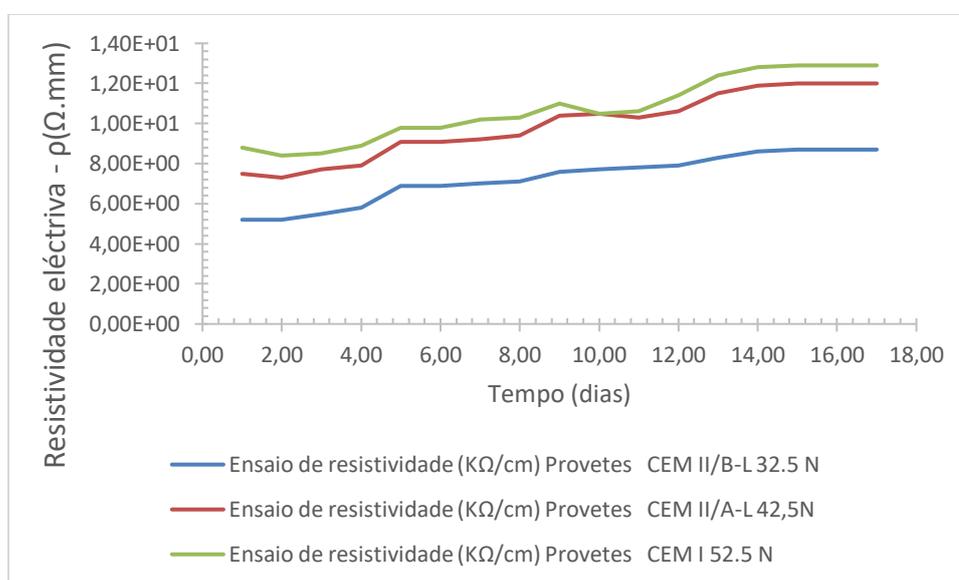


Figura 4.1 - Ensaio de resistividade eléctrica dos cimentos CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N

Deste ensaio, como era de esperar devido às características mecânicas de cada cimento, o que apresenta maior resistividade eléctrica, CEM I 52.5 N, é o que possui maior resistência mecânica. Por sua vez, o cimento CEM II/B-L 32.5 N, o que obteve menor resistividade eléctrica ao longo dos 17 dias de ensaio é também o que apresenta uma menor resistência mecânica.

### 4.3. Resistividade eléctrica de pastas de cimento com corrente contínua

#### 4.3.1. Pastas de cimento com consistência normal

Para se poder depurar a viabilidade do uso deste novo método expedito na medição de tempos de início de presa de pastas de cimento, é necessário comparar os valores dos tempos de presa obtidos com o método de Vicat com este novo método. Para tal, ensaiaram-se misturas cimentícias idênticas, isto é, CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N todas com consistência normal.

Desta forma, neste subcapítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica das pastas de cimento de consistência normal associados a diferentes provetes de ensaio sujeitos a uma tensão elétrica de corrente contínua de 25V, bem como a análise dos resultados dos seus tempos de presa.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal. O provete de ensaio foi em acrílico.

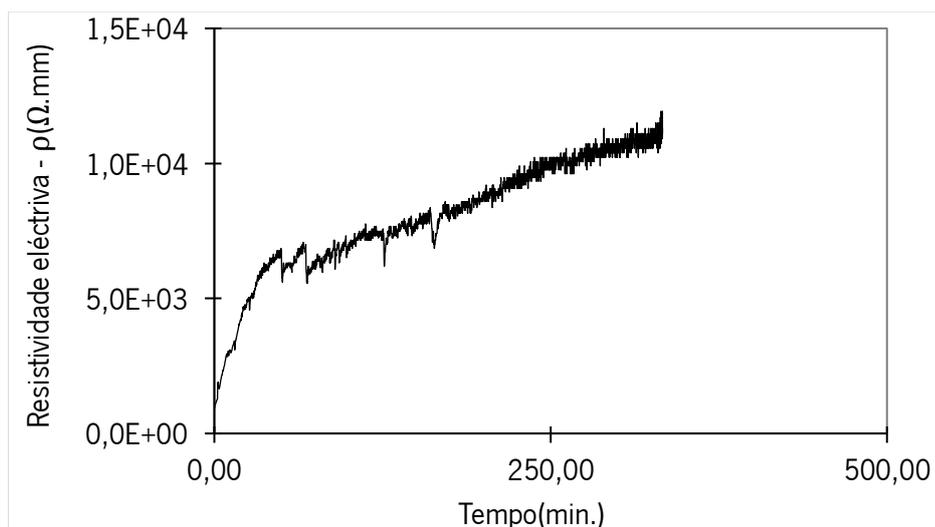


Figura 4.2- Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Através da figura 4.2 podemos observar que, com uma tensão elétrica de 25V e um cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com uma consistência normal num molde de acrílico, desde o início do ensaio até aos 50 min verifica-se um acentuado aumento da resistividade elétrica, a partir dos 50 min até ao final do ensaio a resistividade elétrica aumenta gradualmente.

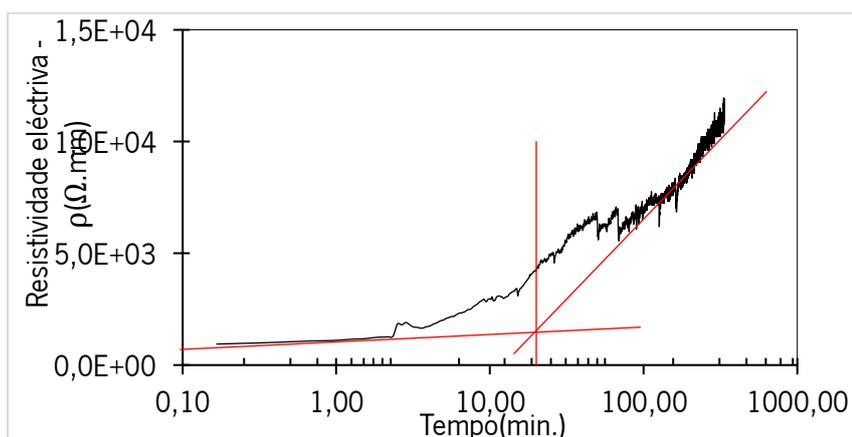


Figura 4.3 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Para se descobrir o tempo de início de presa dos ensaios realizados, através do método expedito desenvolvido, transformou-se o eixo das abcissas do gráfico original (figura 4.2) em base logarítmica de forma a obter-se um gráfico mais perceptível (figura 4.3). De seguida, traçaram-se duas retas por regressão linear. Com a intersecção das duas retas obtêm-se um ponto que, nos indica, aproximadamente, o tempo de início de presa de cada ensaio.

Conforme podemos visualizar na figura 4.3, o tempo de início de presa foi de aproximadamente 20 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com uma consistência normal. O material do provete de ensaio foi em XPS.

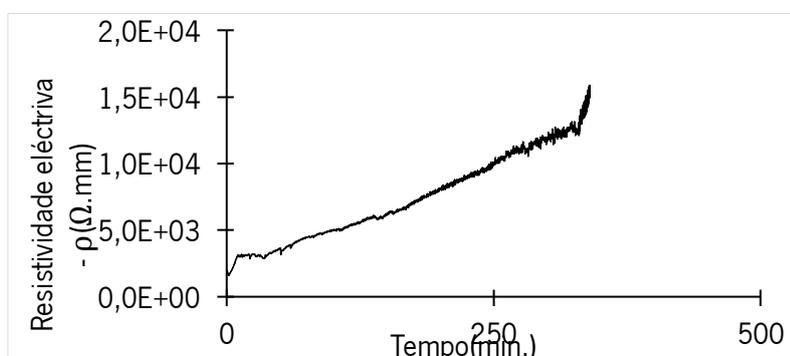


Figura 4.4 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Através da figura 4.4 podemos observar que, com uma tensão elétrica de 25V e um cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com uma consistência normal num molde de XPS, desde o início do ensaio até aos 30 min verifica-se um aumento acentuado da resistividade elétrica, a partir dos 30 min até aos 330 min a resistividade elétrica aumenta de uma forma gradual. No final do ensaio, isto é, dos 330 min até ao final do mesmo verificou-se um aumento acentuado da resistividade elétrica, devido ao facto da pasta de cimento encontrar-se já fase de endurecimento.

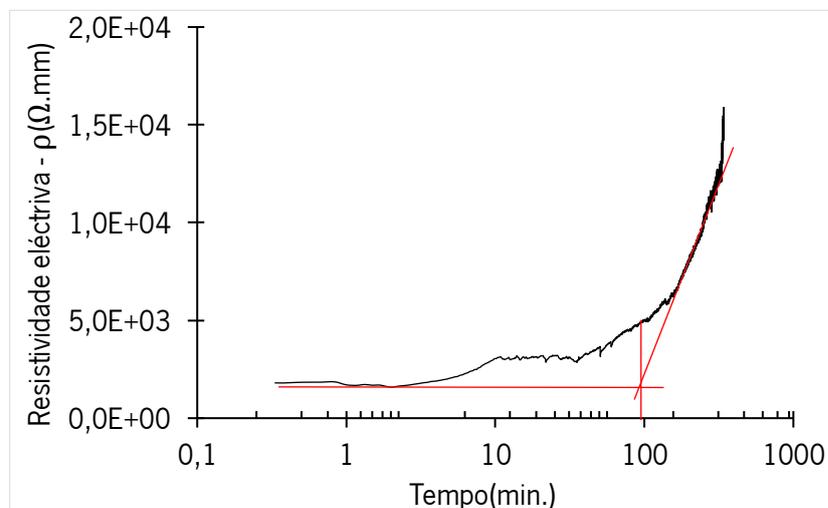


Figura 4.5 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

A figura 4.5 demonstra que o tempo de início de presa foi de aproximadamente 95 min.

A realização destes dois ensaios permite concluir que, para uma pasta de cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal nas condições de ensaio acima expostas, o provete de ensaio XPS foi o que apresentou resultados mais próximos quando comparado com o método tradicional de Vicat.

Neste ensaio foi usado uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal. O provete de ensaio foi em acrílico.

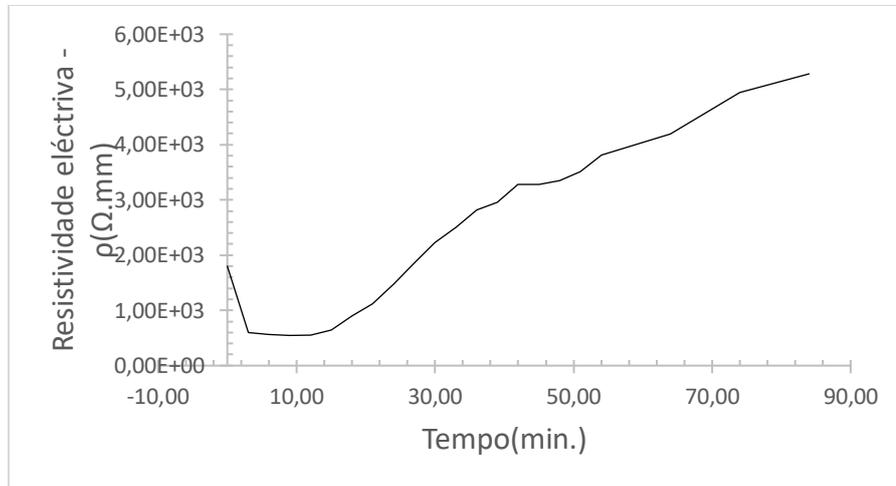


Figura 4.6 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Conforme podemos verificar, na figura acima exposta (figura 4.6), há uma diminuição da resistividade da pasta de cimento desde do início do ensaio até ao minuto 3. A partir do minuto 3 até ao minuto 12 há uma estabilização da resistividade elétrica. Doravante, verificamos um aumento gradual da resistividade elétrica.

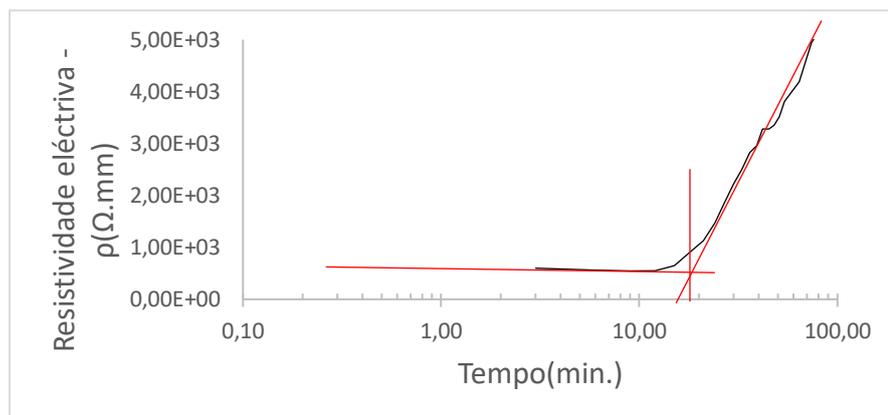


Figura 4.7 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Através da figura 4.7, podemos concluir que, o tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 18 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal. O provete de ensaio foi em XPS.

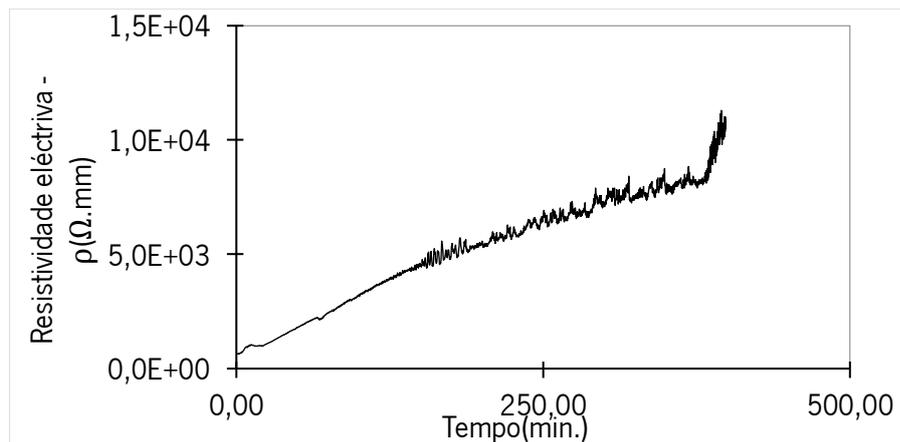


Figura 4.8 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM 42.5 com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Na figura acima exposta (figura 4.8) verificamos que, desde do início do ensaio até ao minuto 383 minuto, existe um aumento gradual da resistividade elétrica, a uma tensão de 25V num molde de XPS.

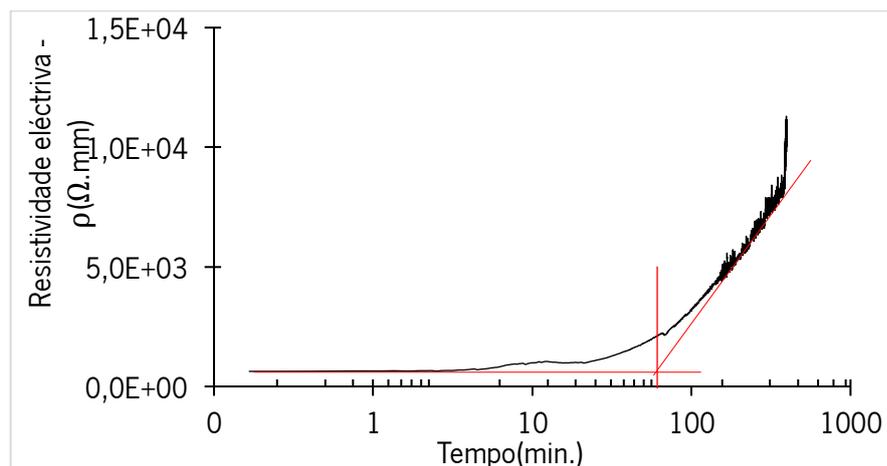


Figura 4.9 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Podemos concluir que, o tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 61 min.

Uma vez mais, depois da realização destes dois ensaios conclui-se que, para uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal nas condições de ensaio acima expostas, o provete em XPS foi o mais eficaz pois foi aquele que apresentou resultados mais aproximados quando comparado com o método tradicional de Vicat.

Estes resultados resultam da diferença de características destes dois materiais na absorção da água. Como já foi referido no capítulo 3, o XPS não é um material que absorve a água enquanto que o acrílico, apesar de ser em pouca quantidade, absorve 2% da humidade presente nas amostras. Como se pode verificar, nos ensaios em que se utilizou o acrílico como material para acolher as amostras, os tempos de início de presa foram mais acelerados quando comparado com os ensaios em que se utilizou o XPS.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com consistência normal. O provete de ensaio foi em acrílico.

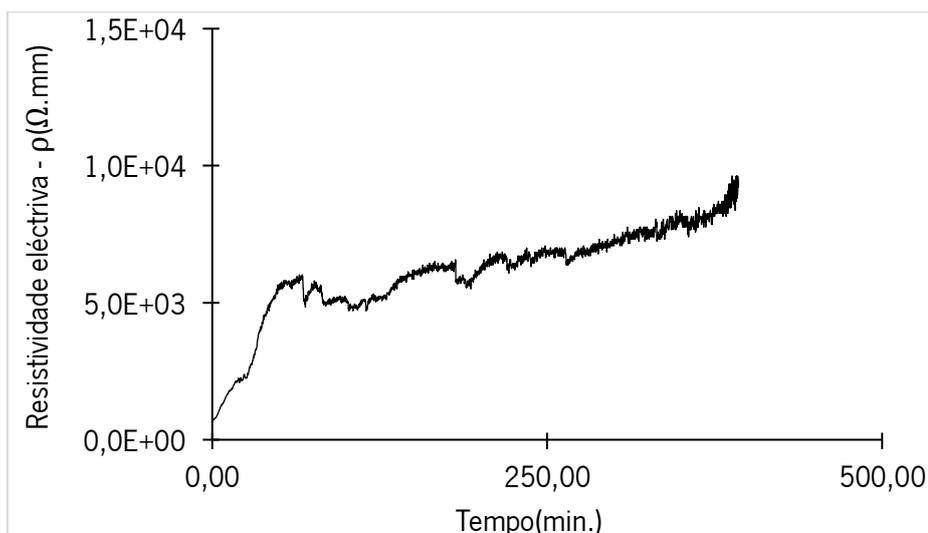


Figura 4.10 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Através da figura 4.10 podemos observar que, com uma tensão elétrica DC de 25V e um cimento do tipo CEM I 52.5 N com uma consistência normal num molde de acrílico, desde o início do ensaio até aos 60 min verifica-se um aumento acentuado da resistividade elétrica. A partir dos 60 min até ao final do ensaio o aumento é gradual.

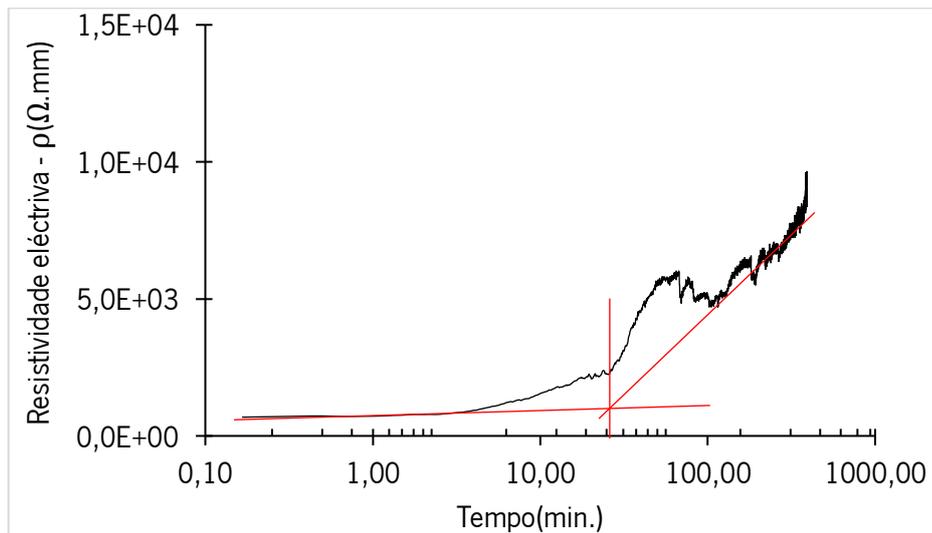


Figura 4.11 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 26 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com consistência normal. O provete de ensaio foi em XPS.

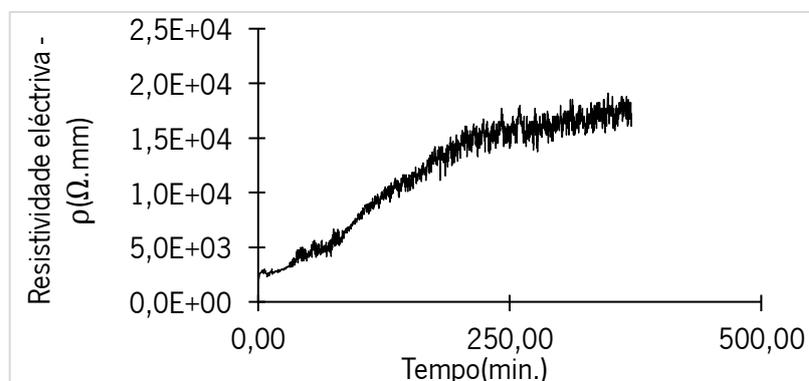


Figura 4.12 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com consistência normal e uma tensão elétrica de 25V num molde de XPS

Na figura acima exposta (figura 4.12) verificamos que, desde do início do ensaio até ao final, existe um aumento gradual da resistividade elétrica, a uma tensão de 25V num molde de XPS.

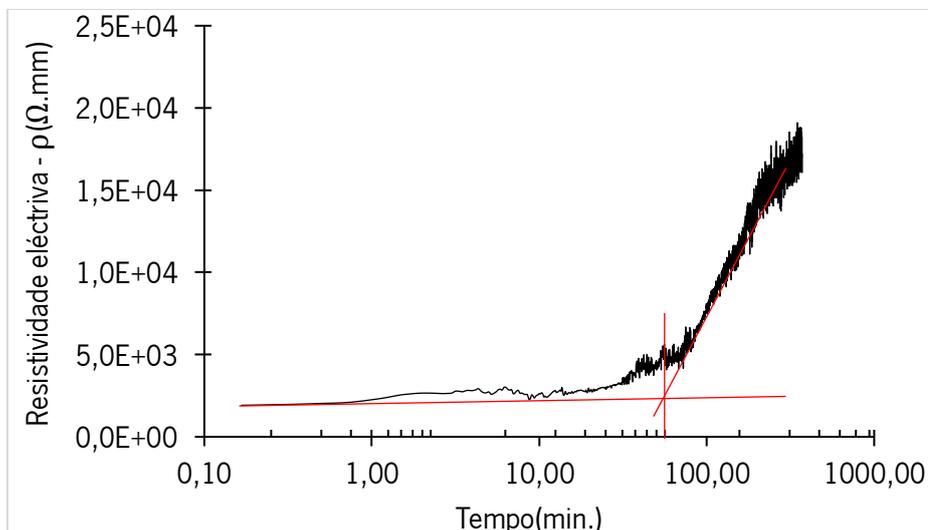


Figura 4.13 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N de consistência normal com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 56 min.

Por fim, para os ensaios de uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com consistência normal nas condições de ensaio acima expostas, o provete de ensaio de XPS foi o que apresentou melhores resultados. Concluindo assim, depois deste subcapítulo, que o XPS é o melhor material para as misturas de cimento ensaiadas nas condições acima expostas.

É de salientar que, em todos os ensaios em que as pastas possuem uma consistência normal, obtiveram-se tempos de presa relativamente mais rápidos comparativamente com o ensaio de Vicat. Este fato deve-se ao efeito de polarização verificado nos ensaios de corrente contínua.

#### 4.3.2. Pastas de cimento com razão água ligante 0.5

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0,5.

O provete de ensaio foi em XPS.

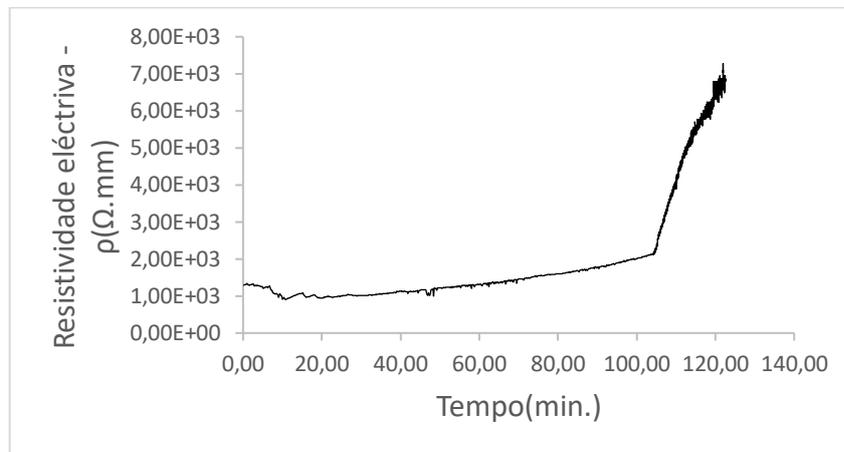


Figura 4.14 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Através da figura 4.14 podemos observar que, com uma tensão elétrica DC de 25V e um cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com A/L de 0.5 num molde de XPS, desde o início do ensaio até aos 10 min verifica-se uma ligeira descida da resistividade. A partir do minuto 10 até aos 105 aumento verifica-se um aumento gradual da resistividade elétrica. A partir dos 105 min até ao final do ensaio o aumento acentuado da resistividade.

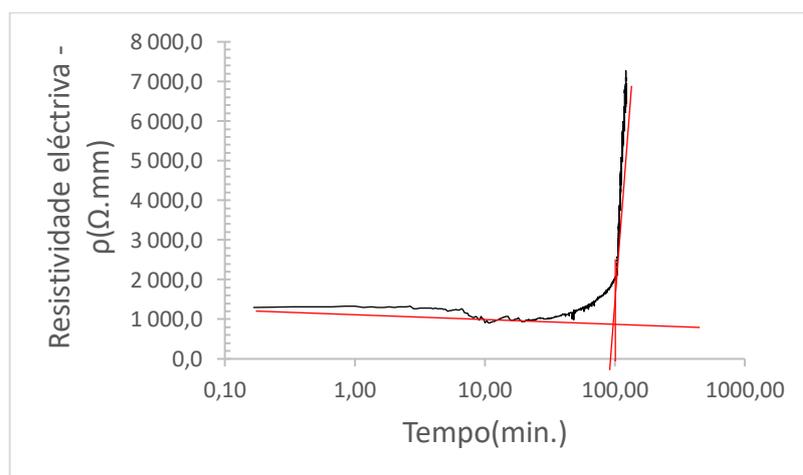


Figura 4.15 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 101 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5. O provete de ensaio foi em acrílico.

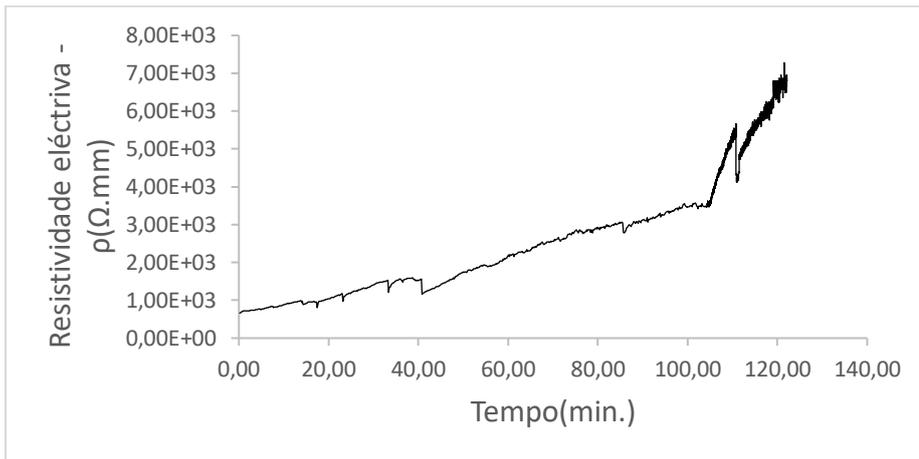


Figura 4.16 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Podemos constatar na figura 4.16 há um aumento gradual e constante da resistividade elétrica desde o início do ensaio até ao minuto 105 e, um aumento acentuado a partir desse instante até ao final do ensaio.

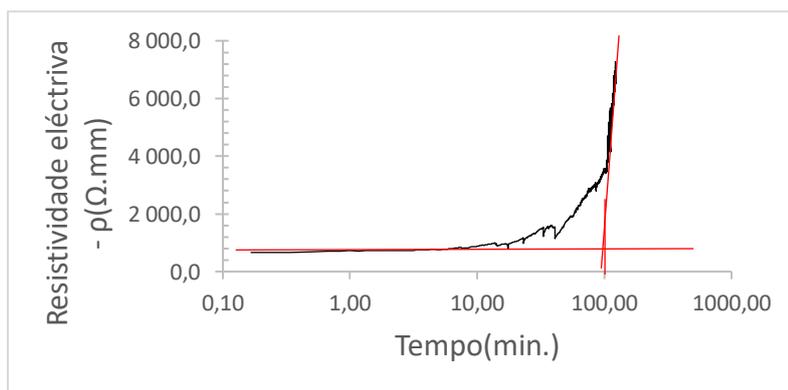


Figura 4.17 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 101 min.

Para um cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N com uma razão de A/L 0.5 nas condições de ensaio acima expostas, constatou-se que o material do provete de ensaio não foi um fator influenciador nos ensaios, tendo até obtido inícios de presa idênticos em ambos os casos.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5. O provete de ensaio foi em XPS.

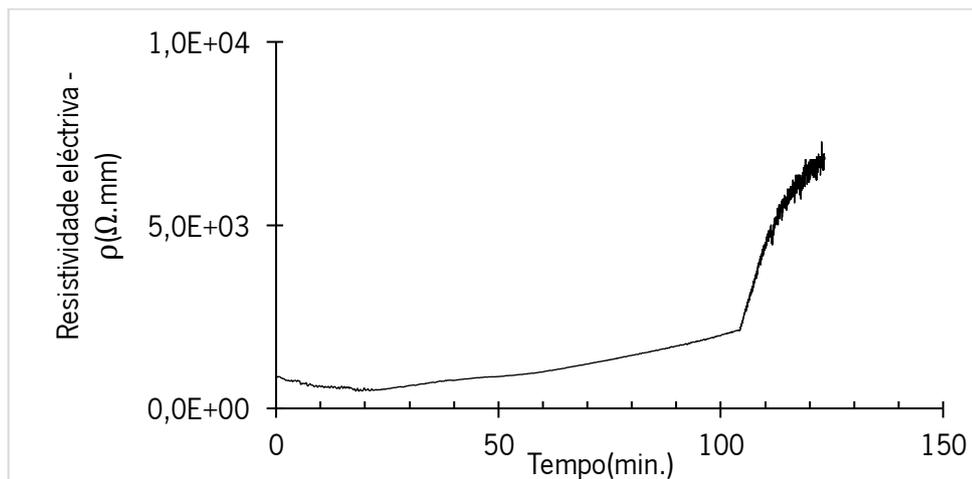


Figura 4.18 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Através da figura 4.18 podemos observar que, com uma tensão elétrica DC de 25V e um cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R com A/L de 0.5 num molde de XPS, desde o início do ensaio até aos 19 min verifica-se uma ligeira descida da resistividade. A partir do minuto 19 até aos 104 aumento verifica-se um aumento gradual da resistividade elétrica. A partir dos 105 min até ao final do ensaio o aumento da resistividade é acentuado.

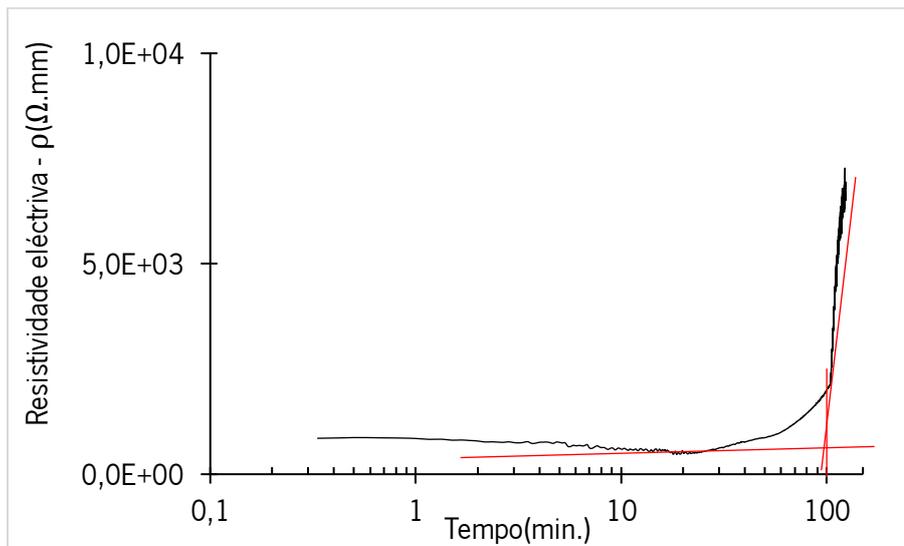


Figura 4.19 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 100 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5. O provete de ensaio foi em acrílico.

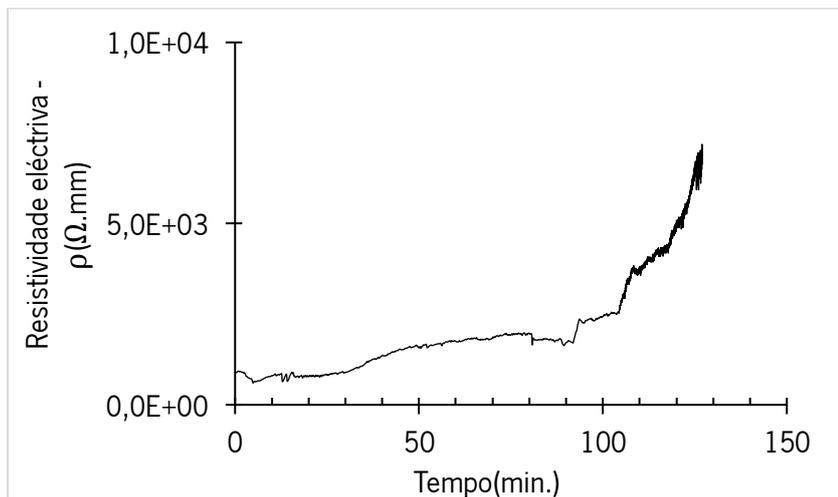


Figura 4.20 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Através da figura 4.20 podemos observar que, desde o início do ensaio até aos 103 minutos verifica-se um aumento gradual da resistividade elétrica. A partir dos 104 minutos até ao final do ensaio há um aumento acentuado da resistividade elétrica.

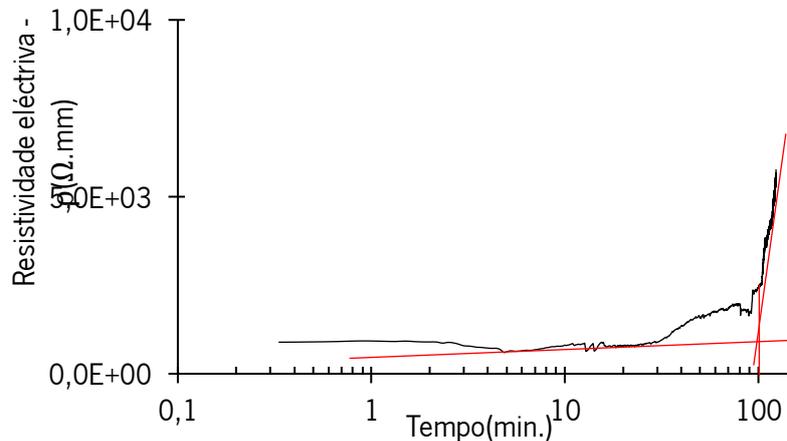


Figura 4.21 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 101 minutos.

Com uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R e uma razão A/L de 0.5 nas condições de ensaio acima expostas, constatou-se que a escolha do material do provete de ensaio não teve qualquer influência nos tempos de início de presa, pois em ambos os casos o valor foi quase idêntico.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com A/L 0.5. O provete de ensaio foi em XPS.

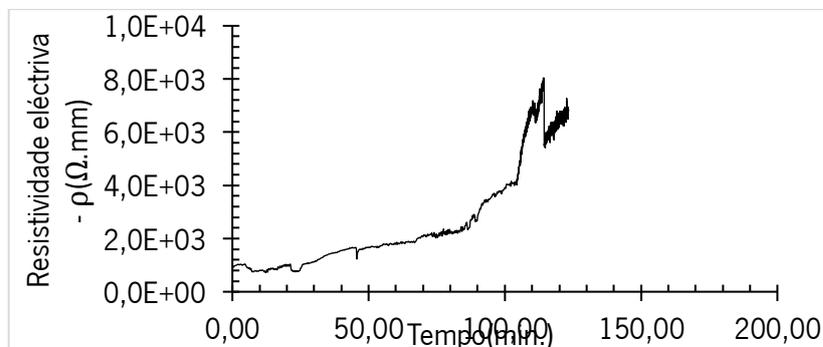


Figura 4.22 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Neste ensaio (figura 4.22) há um aumento progressivo e ligeiro da resistividade elétrica até ao minuto 90. Por fim, do minuto 90 até ao final do ensaio verifica-se um aumento acentuado da resistividade elétrica.

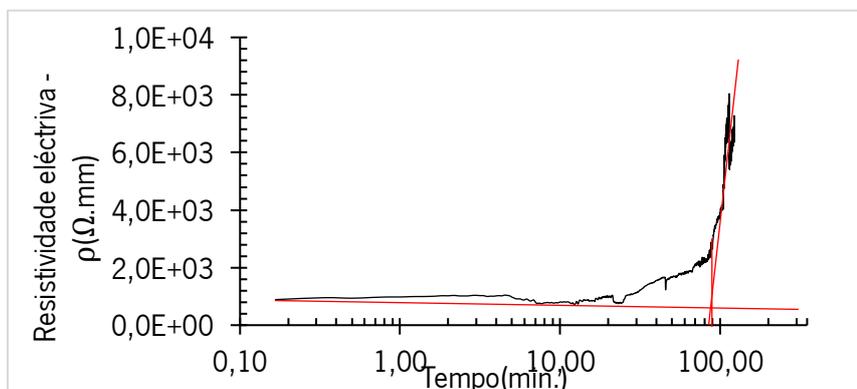


Figura 4.23 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 89 min.

Neste ensaio foi submetido uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com A/L 0.5. O provete de ensaio foi em acrílico.

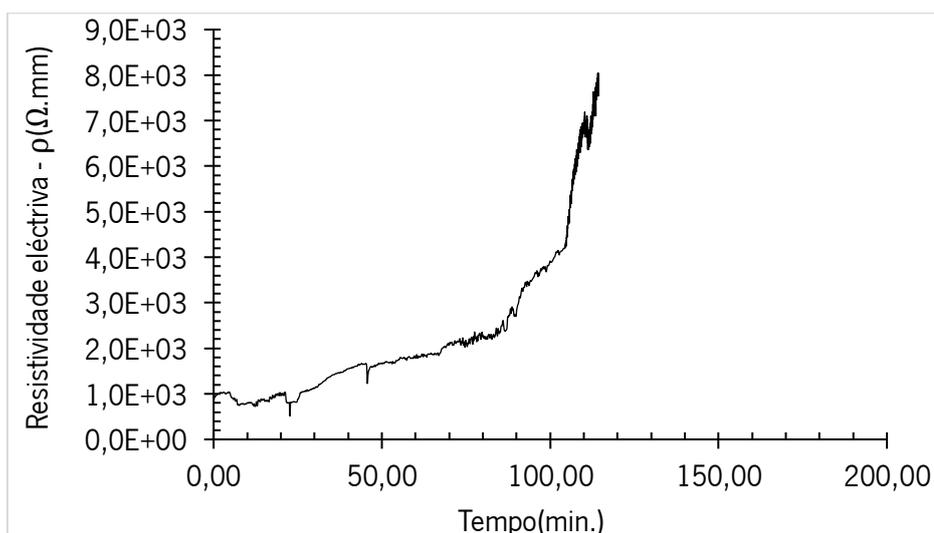


Figura 4.24 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

Através da figura 4.24 podemos observar que, com uma tensão elétrica de 25V e um cimento do tipo CEM I 52.5 N com A/L de 0.5 num molde de acrílico, desde o início do ensaio até aos 9 minutos verifica-se uma ligeira descida da resistividade. A partir do minuto 10 até aos 86 minutos verifica-se um aumento gradual da resistividade elétrica. A partir dos 87 min até ao final do ensaio o aumento acentuado da resistividade.

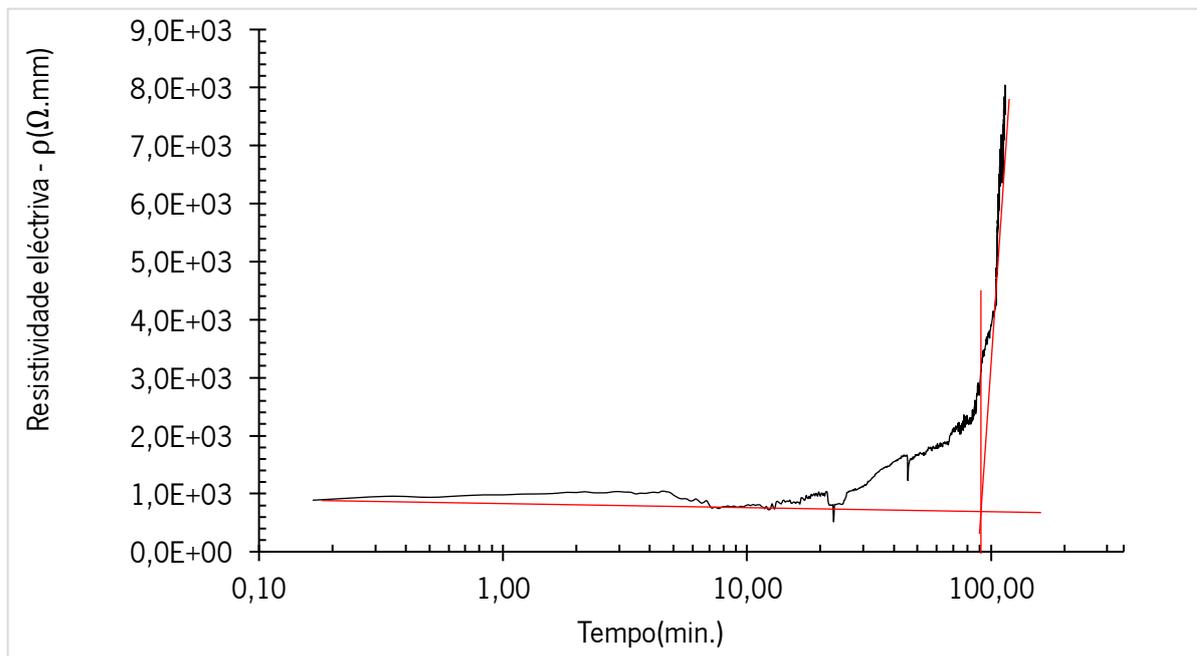


Figura 4.25 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.5 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de acrílico

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 91 min.

Nos ensaios em que foi usado uma pasta de cimento do tipo CEM I 52.5 N com uma razão A/L de 0.5 nas condições acima expostas verifica-se que tanto no XPS como no acrílico os resultados dos inícios de presa foram muito idênticos concluindo assim que não foi um fator influenciador.

As principais conclusões que se retiram dos ensaios deste subcapítulo é de que existe um padrão entre os vários ensaios quanto à mudança da resistividade elétrica ao longo dos ensaios, isto é, de uma forma generalizada os ensaios apresentam três fases distintas quanto ao comportamento da resistividade elétrica ao longo do tempo. A primeira fase, um período curto, verifica-se uma diminuição ligeira da resistividade elétrica. De seguida, a segunda fase, constata-se um aumento ligeiro da resistividade elétrica durante um período maior. Salienta-se que, no final da fase 2, encontra-se o tempo de início de presa em todos os ensaios. Na última fase, verifica-se um aumento mais acentuado da resistividade elétrica, deduzindo-se que é a fase em que a pasta já ultrapassou o fim de presa e, portanto, o aumento da resistividade elétrica é consideravelmente maior nesse período. Além disso, constatou-se que os ensaios realizados em XPS foram os que obtiveram resultados mais precisos quando comparados com o acrílico. Também se constatou que usando uma tensão elétrica DC de 25V e uma razão de A/L 0.5 a escolha do material não influenciou os resultados obtidos.

Nestes ensaios constatou-se que, não se verificou uma diferença desfasada dos resultados de tempos de início de presa, entre o material XPS e o acrílico. A este facto deve-se à quantidade de água presente nas amostras deste subcapítulo serem superiores aos das pastas de consistência normal e, assim os 2 % de humidade que o acrílico absorve não demonstraram ser influentes nos valores dos tempos de início de presa.

#### **4.3.3. Pastas de cimento com razão água ligante 0.35**

Neste subcapítulo foram ensaiados três tipos de pasta com A/L de 0.35. Dos ensaios desenvolvidos nos subcapítulos antecedentes, verificou-se que o material mais eficaz, isto é, o que apresentou resultados mais precisos do idealizado foi o XPS. A este fato deve-se provavelmente às características do material XPS. Deste modo, foram apenas realizados ensaios usando esse material, descartando o acrílico.

No primeiro ensaio foi utilizado um cimento do tipo CEM II/B-L 32.5 N

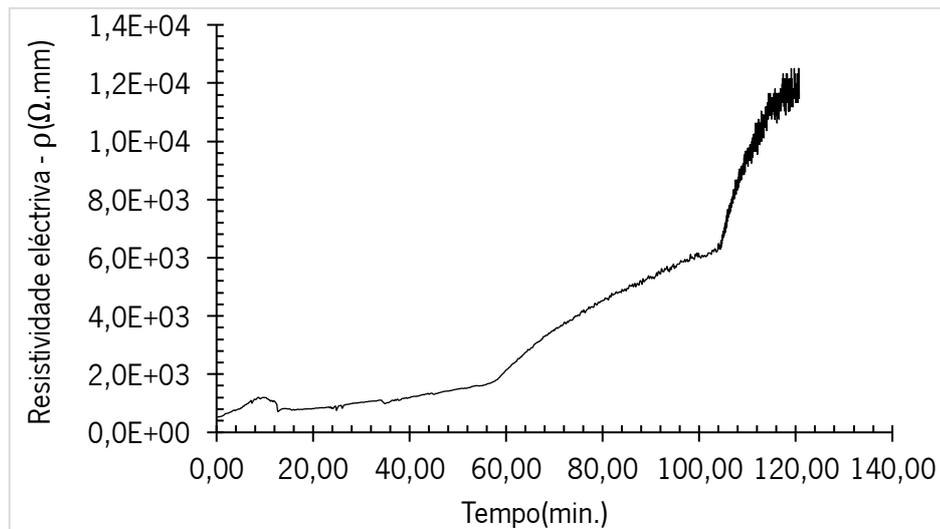


Figura 4.26 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Através da figura acima exposta (figura 4.26), verifica-se que desde do início do ensaio até ao minuto 58, há um ligeiro aumento da resistividade elétrica da pasta. Após esse instante até ao minuto 105, verifica-se um aumento mais acentuado da resistividade. Por fim, desde o último instante referenciado até ao final do ensaio, o valor da resistividade ao longo do tempo aumentou exponencialmente.

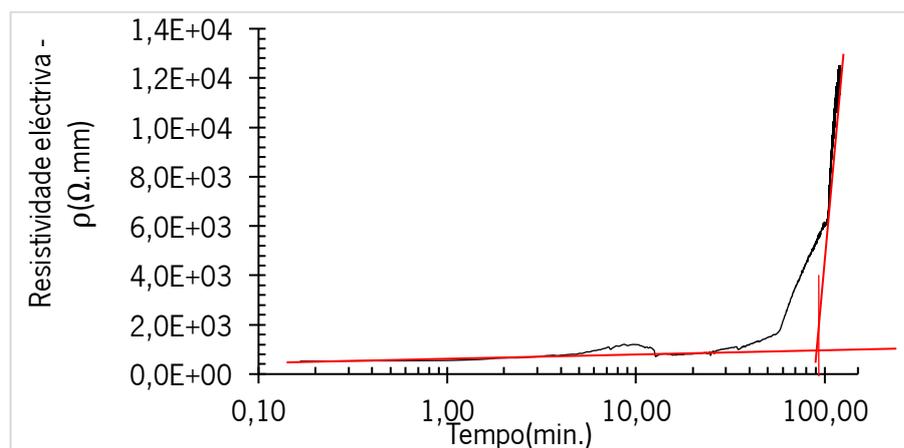


Figura 4.27 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N com A/L 0.35 com uma tensão elétrica de 25V DC num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 93 min.

No ensaio seguinte foi testado uma pasta de cimento do tipo CEM II/A-L 42.5 R

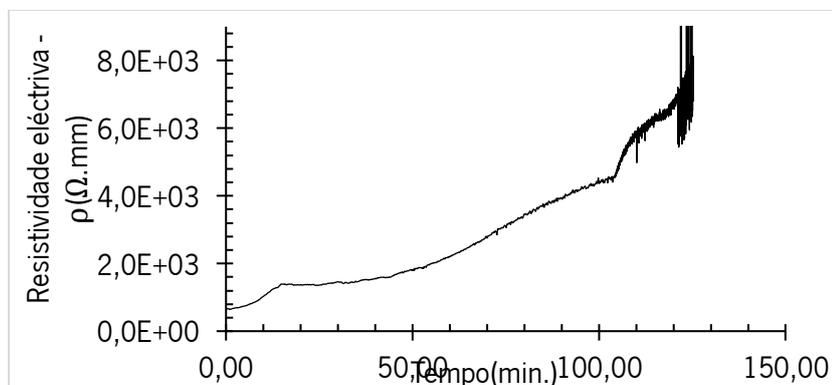


Figura 4.28 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Podemos constatar na figura acima exposta existe um aumento gradual da resistividade elétrica desde o início do ensaio até ao minuto 105 e, um aumento acentuado a partir desse instante até ao final do ensaio.

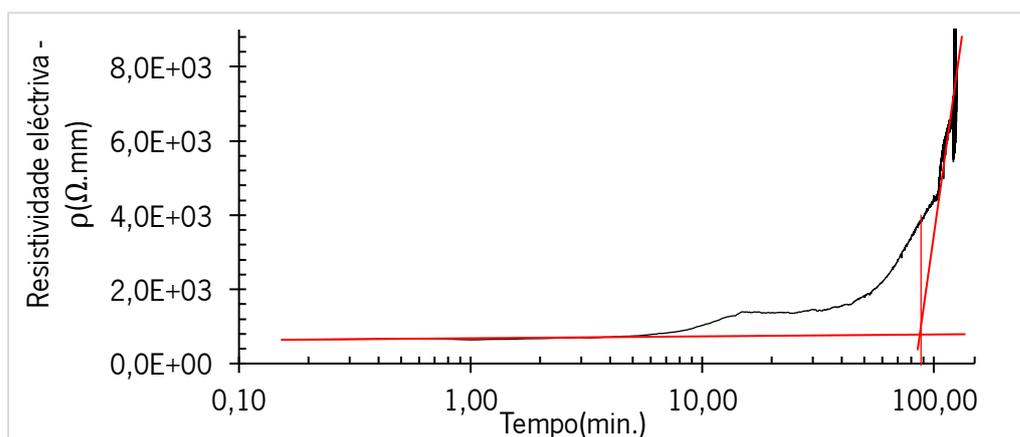


Figura 4.29 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.35 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 88 min.

Por fim, foi ensaiado uma pasta do tipo CEM I 52.5 N.

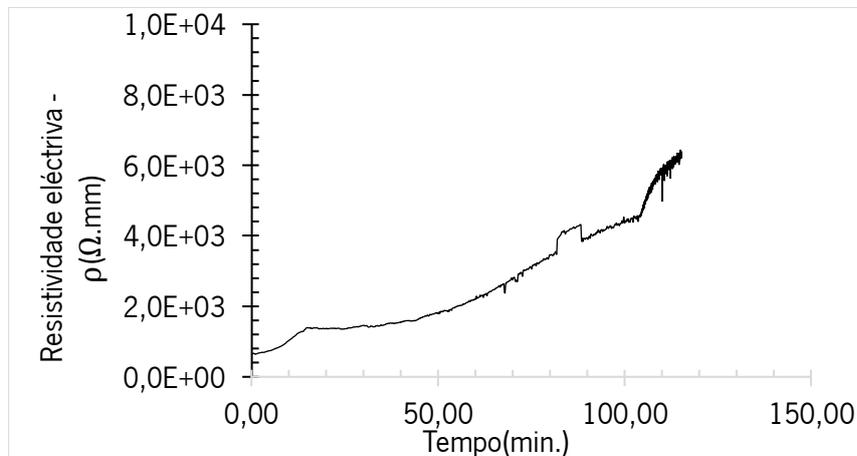


Figura 4.30 - Resistividade elétrica de uma pasta de um cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.35 e uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

Através da análise da figura acima exposta (figura 4.30) verificamos que, desde do início do ensaio até ao minuto 103 minuto, existe um aumento gradual da resistividade elétrica. A partir do minuto 104 até ao final deste ensaio verifica-se um aumento mais acentuado.

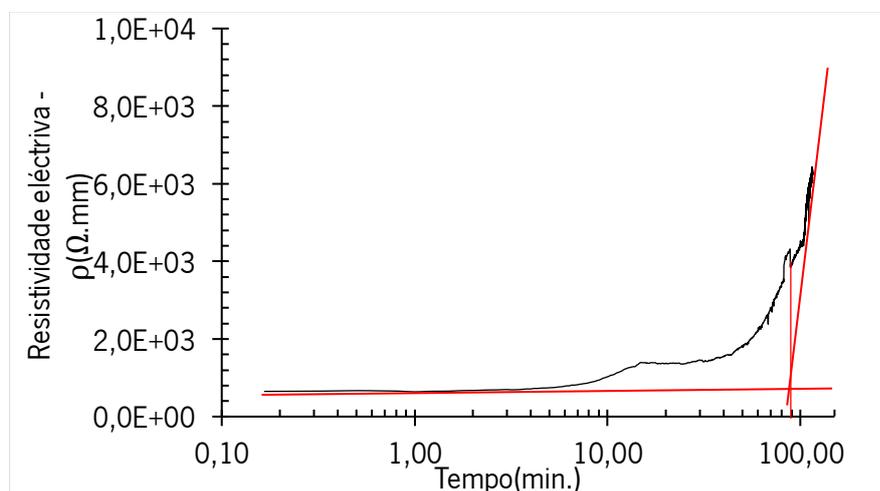


Figura 4.31 - Determinação do tempo de presa de uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.35 com uma tensão elétrica DC de 25V num molde de XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 89 min.

#### 4.4. Resistividade elétrica das pastas de cimento com corrente alternada

Como já foi referido anteriormente o uso de corrente contínua nos ensaios, provoca um efeito de polarização nas amostras ensaiadas. Esse fenómeno, para ensaios da resistividade das pastas de cimento, provoca uma aceleração dos tempos de presa. Posto isto, foi necessário realizar ensaios com corrente alternada de forma a evitar esse efeito e, comparar os tempos de presa deste novo sistema com o ensaio de Vicat.

##### 4.4.1. Pastas de cimento de consistência normal

Neste subcapítulo serão ensaiadas pastas de cimento com consistência normal de maneira a se poder efetuar uma comparação com os tempos de início obtidos no ensaio de Vicat.

Neste ensaio foi ensaiado uma pasta de cimento CEM II/B-L 32.5 N

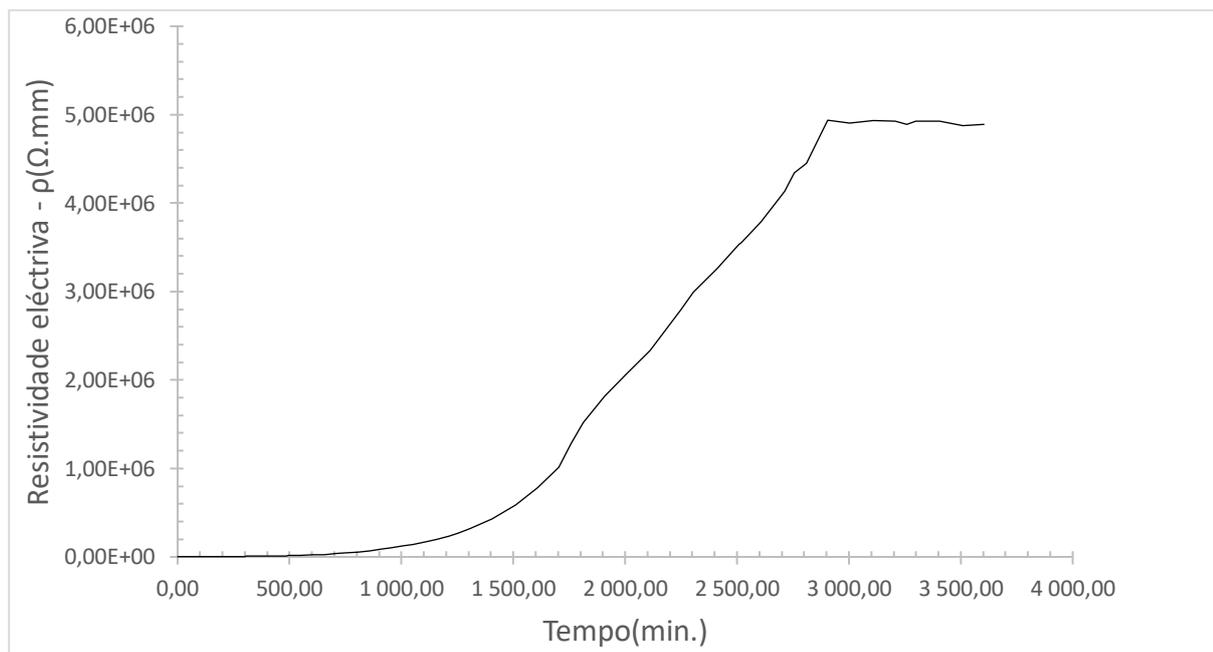


Figura 4.32 – Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS

Da análise da figura 4.33 conclui-se que, há um aumento gradual pouco acentuado da resistividade elétrica até ao minuto 800, após esse momento o valor da resistividade aumenta de forma mais acentuada até ao final do ensaio.

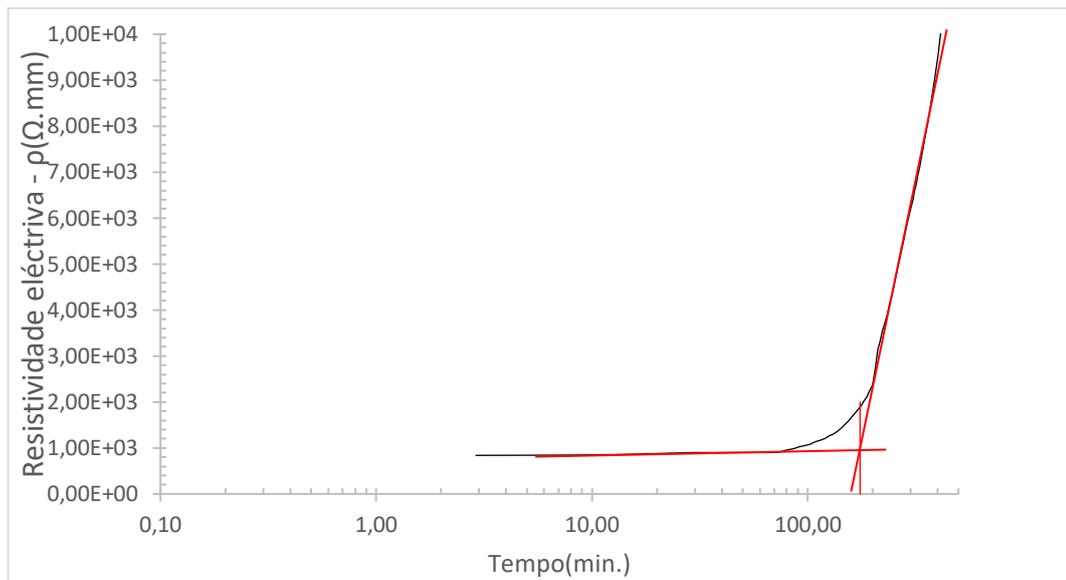


Figura 4.33 – Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa deste ensaio é de aproximadamente 175min.

De seguida, foi ensaiada uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R

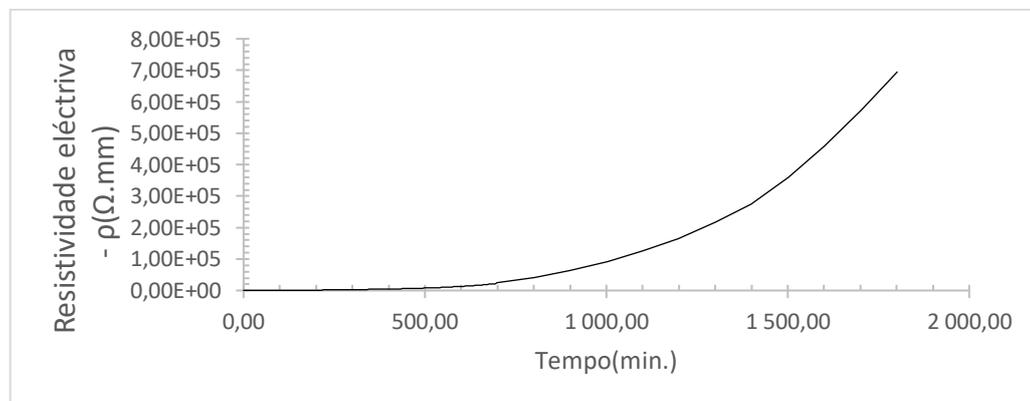


Figura 4.34 – Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e corrente alternada em XPS

O resultado do ensaio exposto na figura 4.35 permite verificar que existe um aumento da resistividade elétrica pouco significativo até ao minuto 650. A partir desse instante até ao final do ensaio o aumento é mais acentuado.

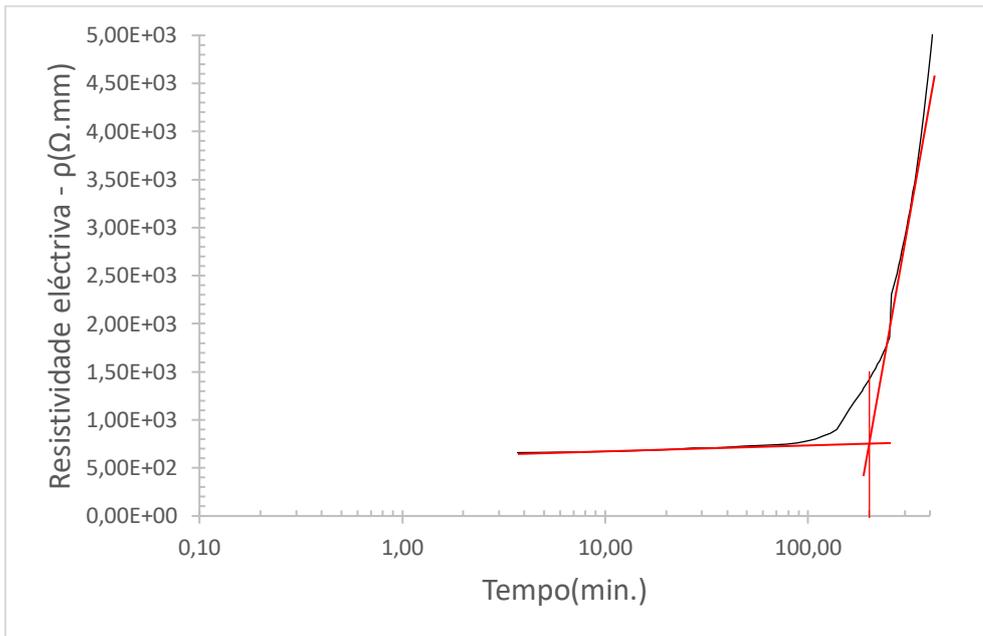


Figura 4.35 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com consistência normal e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa deste ensaio é de aproximadamente 201 min.

Por fim, foi ensaiada uma pasta de cimento CEM I 52.5 N

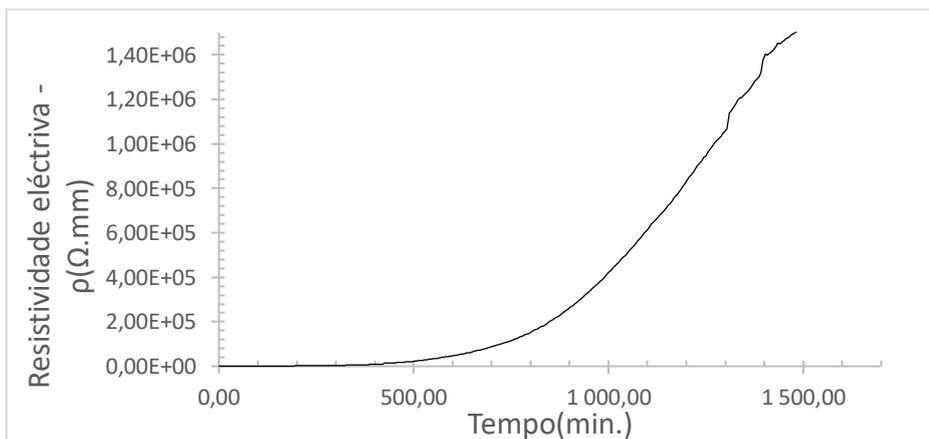


Figura 4.36 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS

Deste ensaio (figura 4.37), consegue-se observar um aumento da resistividade pouco significativo até ao minuto 450. Desse instante até ao final do ensaio, verifica-se um aumento mais acentuado da resistividade elétrica.

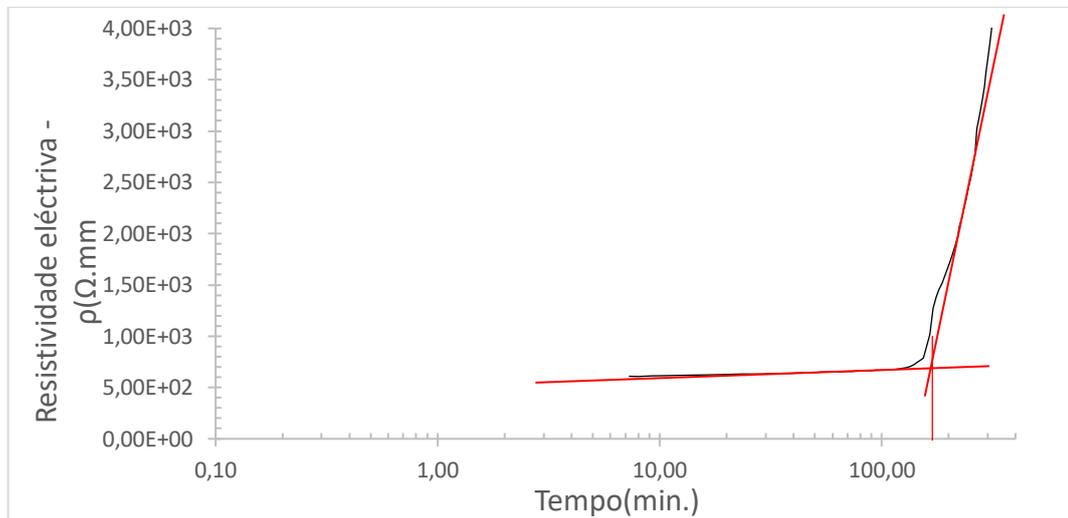


Figura 4.37 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com consistência normal e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa para este ensaio foi de aproximadamente 169 min.

#### 4.4.2. Pastas de cimento com razão A/L 0.35

De forma a se poder fazer uma comparação entre os tempos de início de presa no método expedito desenvolvido em que foi usado corrente contínua, com o método de impedância em que se usa corrente alternada, procedeu-se a realização dos mesmos ensaios realizados com o método expedito.

Posto isto, neste ensaio foi ensaiada uma pasta cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L de 0.35.

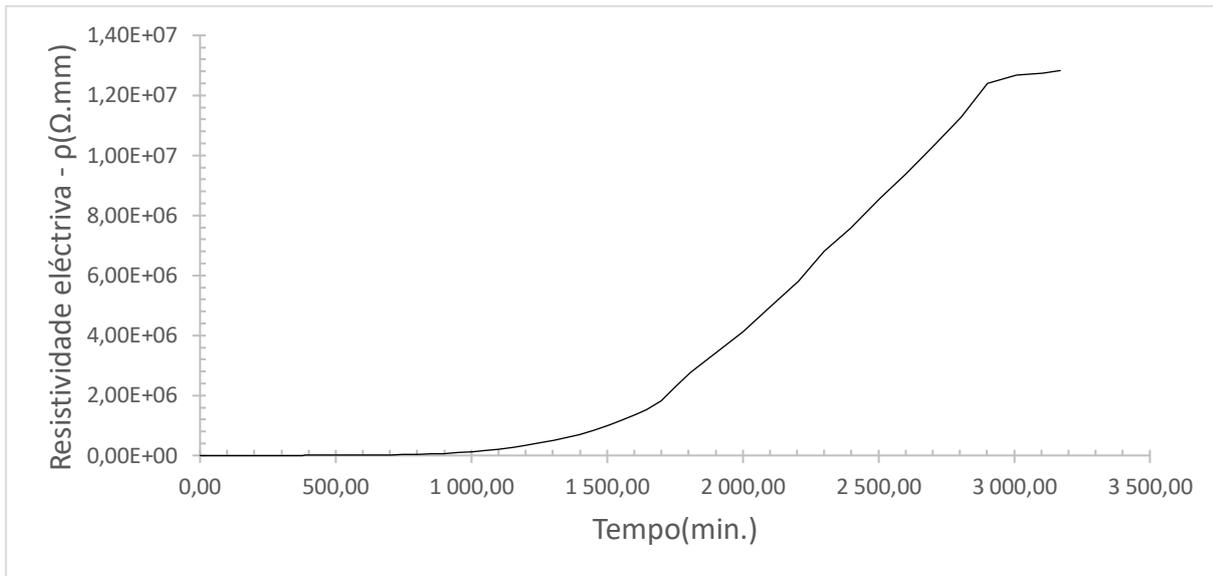


Figura 4.38 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS

A partir da figura 4.39 conclui-se que a resistividade elétrica aumenta de uma forma mais lenta até ao minuto 1110. Após esse instante até ao final do ensaio, verifica-se que há um aumento mais acentuado.

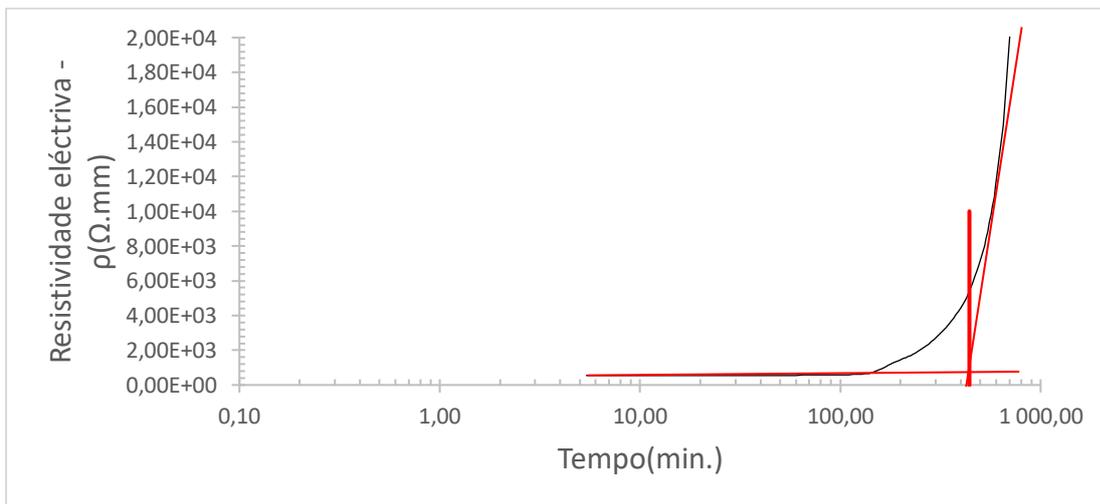


Figura 4.39 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa deste ensaio é de aproximadamente 441 min.

De seguida, neste ensaio foi testada uma pasta de cimento CEM I 52.5 N com A/L 0.35

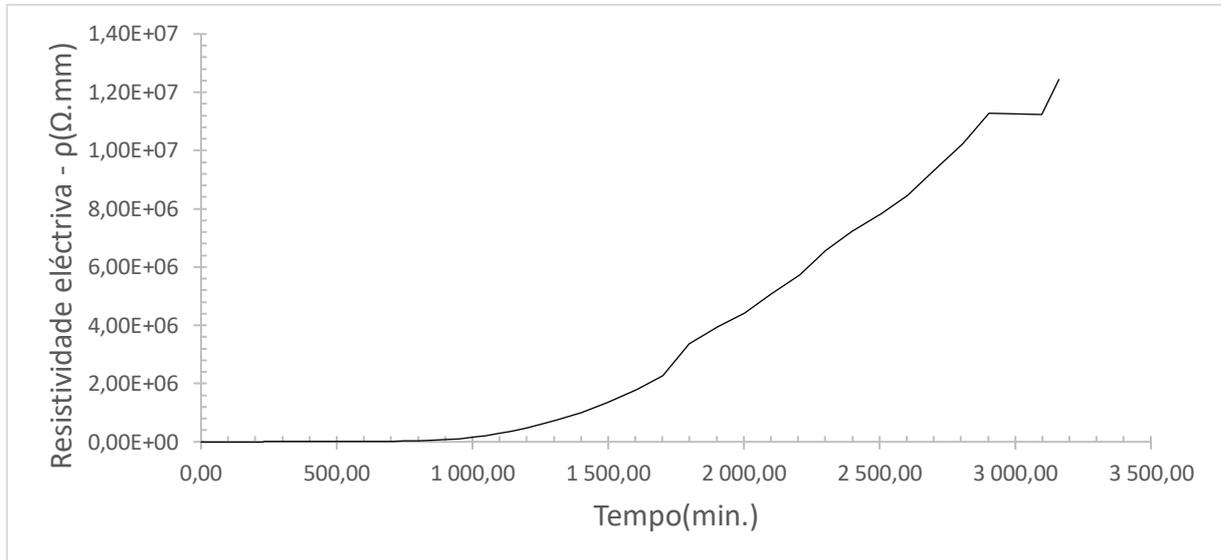


Figura 4.40 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS

Da análise da figura 4.41, pode-se concluir que a resistividade elétrica da pasta de cimento apresenta um aumento pouco acentuado até ao minuto 1100. Desse instante até ao final do ensaio, o aumento é mais acentuado.

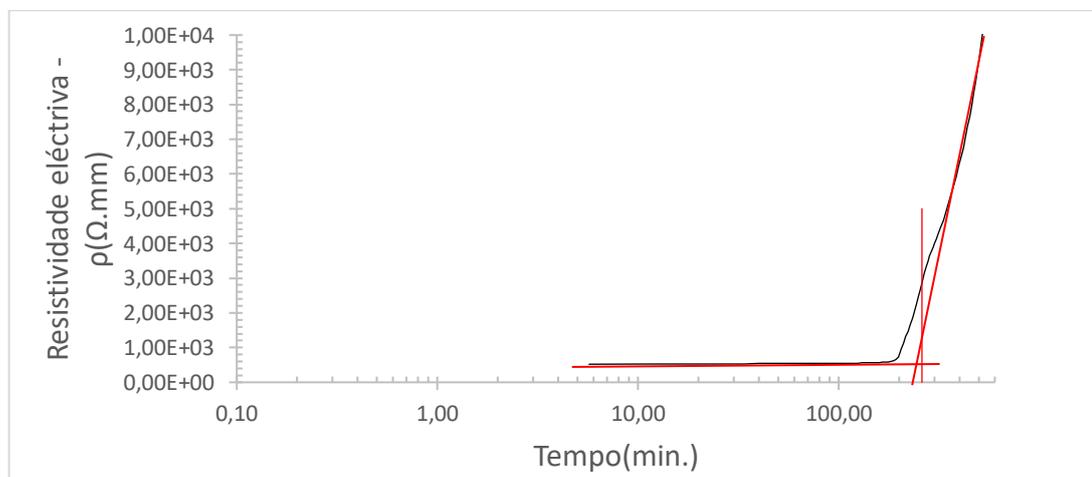


Figura 4.41 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.35 e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa é de aproximadamente 260 min.

#### 4.4.3. Pastas de cimento com razão A/L 0.5

Tal como se procedeu nos ensaios realizados com o método expedito desenvolvido, neste subcapítulo serão ensaiadas as mesmas três pastas de cimento que têm vindo a ser estudadas com uma razão de A/L 0.5.

Cimento CEM II/B-L 32.5 N

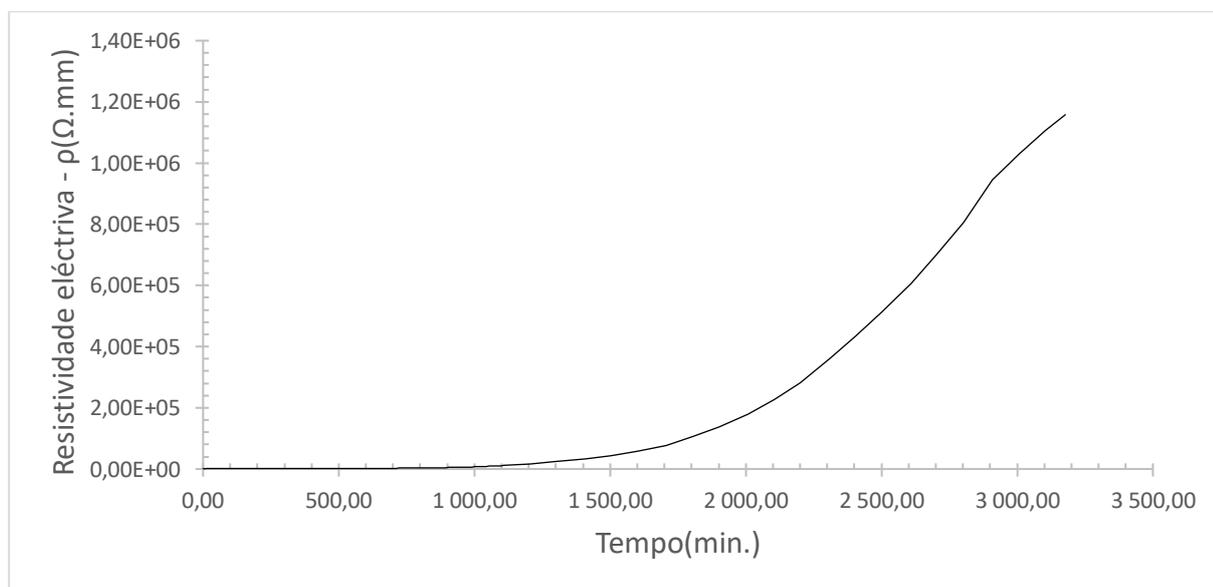


Figura 4.42 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

A partir da figura 4.43 conclui-se que o aumento da resistividade elétrica é pouco significativo até ao minuto 1100 e, logo de seguida há um aumento mais acentuado até ao final deste ensaio.

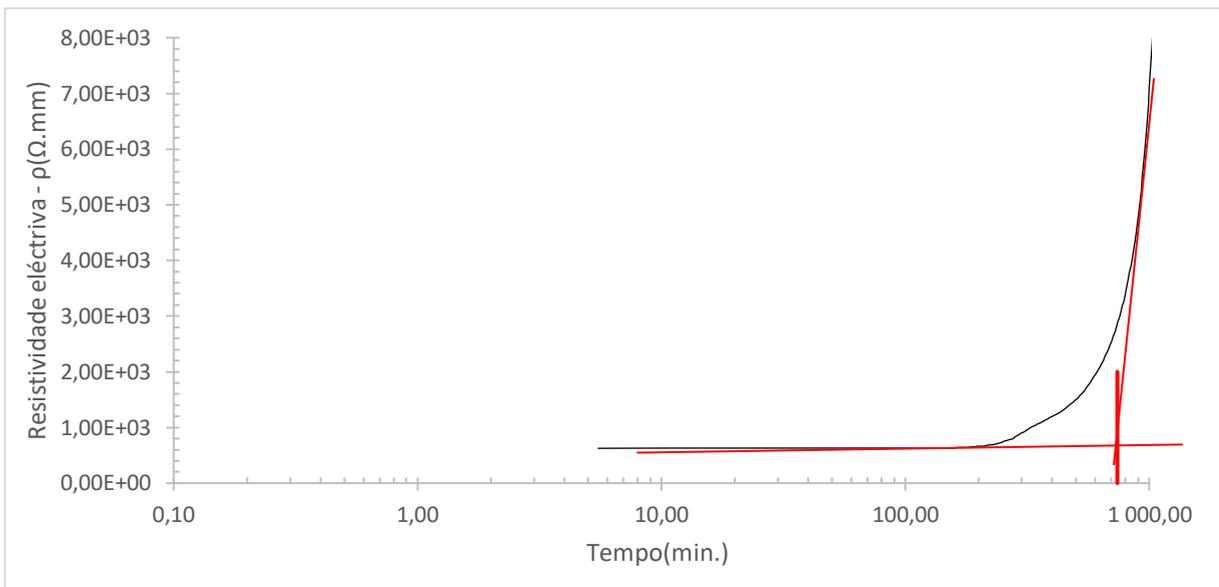


Figura 4.43 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/B-L 32.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa é de aproximadamente 740 min.

No segundo ensaio deste subcapítulo foi testada uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R

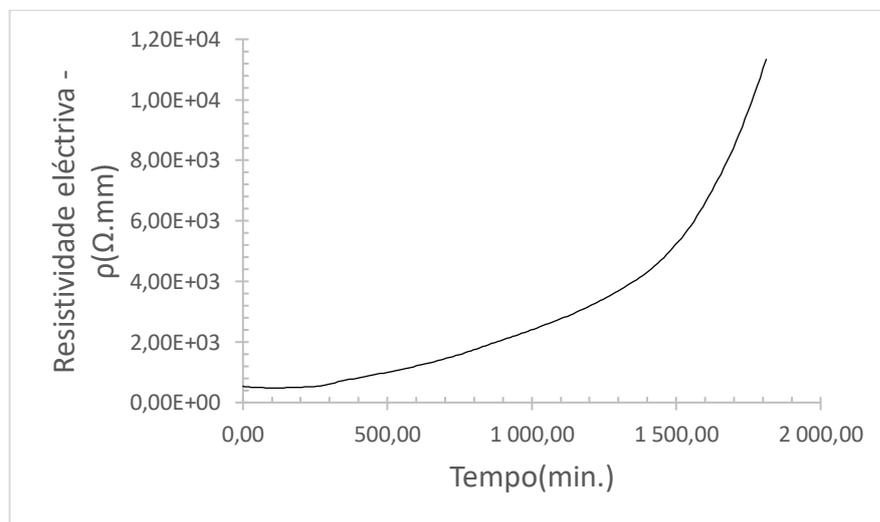


Figura 4.44 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

A partir da análise da figura 4.45, verifica-se uma ligeira diminuição e uma estabilização da resistividade elétrica desde do início de ensaio até ao minuto 277. Após esse instante a resistividade elétrica sofre um aumento mais acentuado até ao final do ensaio.

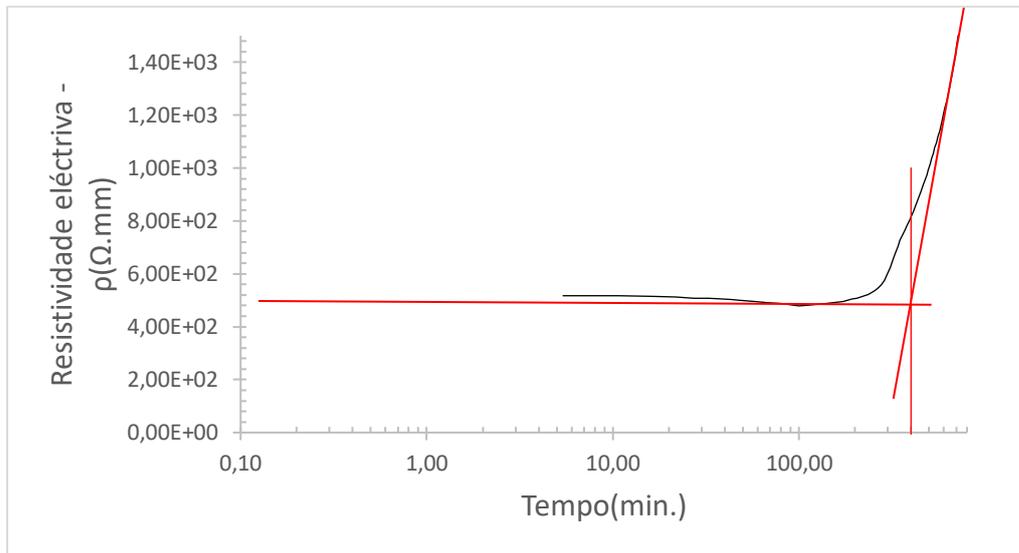


Figura 4.45 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa é de aproximadamente 400 min.

Por último, foi testada uma pasta de cimento CEM I 52.5 N

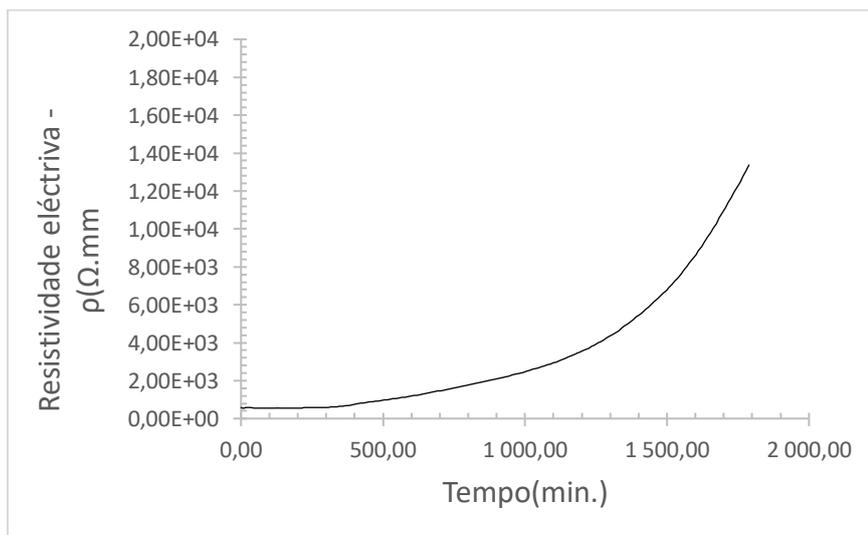


Figura 4.46 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

O resultado deste ensaio (figura 4.47) mostra-nos que a resistividade elétrica sofre um aumento pouco significativo até ao minuto 290. De seguida, a resistividade aumenta gradualmente até ao fim do ensaio.

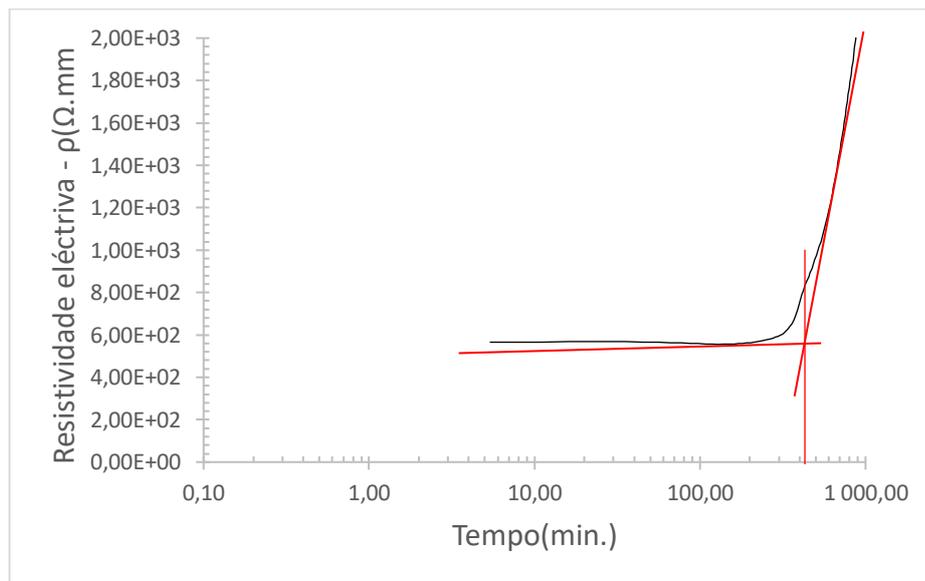


Figura 4.47 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM I 52.5 N com razão A/L 0.5 e corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa foi de aproximadamente 430 min.

O aumento do A/L provocou um esperado aumento do tempo de presa para a pasta de cimento CEM I 52.5 N enquanto que para uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R o aumento do A/L não provocou um aumento significativo do tempo de início de presa.

#### 4.4.4. Pastas de cimento com adições

Neste subcapítulo serão averiguados os efeitos do uso de adições na medição dos tempos de presa com o uso de corrente alternada na medição da resistividade elétrica para a pasta de cimento CEM II/A-L

42.5 R. A quantidade de adição implementada no primeiro ensaio foi de 25% e no segundo 50%. A adição utilizada foi cinzas volantes.

Desta forma, neste ensaio foi testada uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com 25% de CV e com A/L de 0.35.

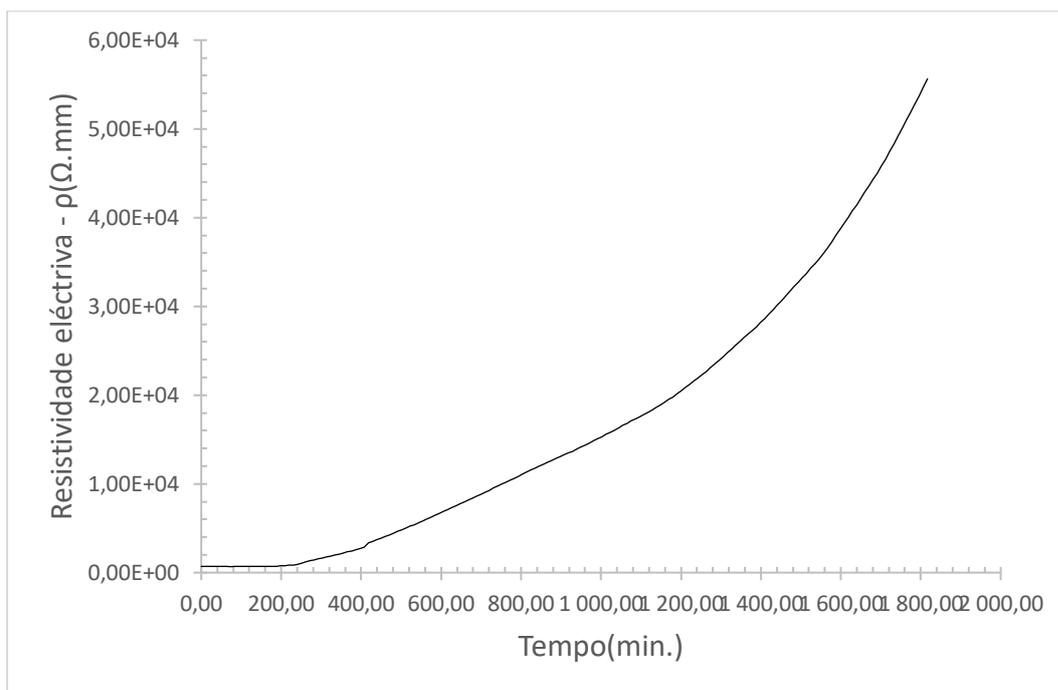


Figura 4.48 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 25% de CV e A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS

A partir da análise da figura 4.49, verifica-se que a resistividade elétrica estabiliza desde do início do ensaio até ao minuto 200. A partir desse instante até ao final do ensaio a resistividade elétrica aumenta gradualmente.

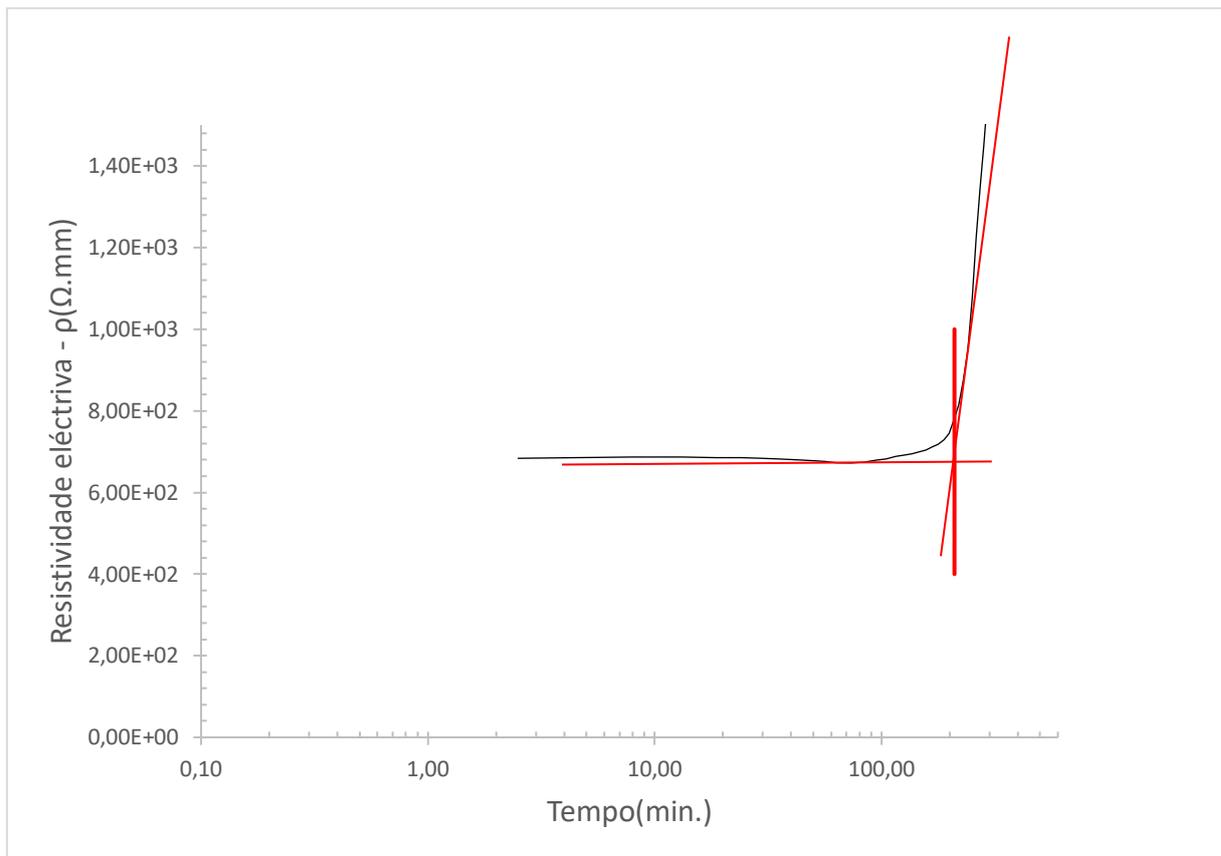


Figura 4.49 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 25% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa é de aproximadamente 210 min.

Se fizermos uma comparação do ensaio em que foi usada uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com A/L 0.35 (figura 4.40), com o ensaio homólogo mas com 25 % de CV conclui-se que o tempo de início de presa obtido para este último (figura 4.50) , 210 minutos, foi claramente inferior aos 441 min obtidos (figura 4.40). Deste modo, a aplicação de 25 % de CV induziu uma aceleração do início de presa para estas condições de ensaio.

De seguida, foi testada uma pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R com 50% de CV e A/L de 0.35

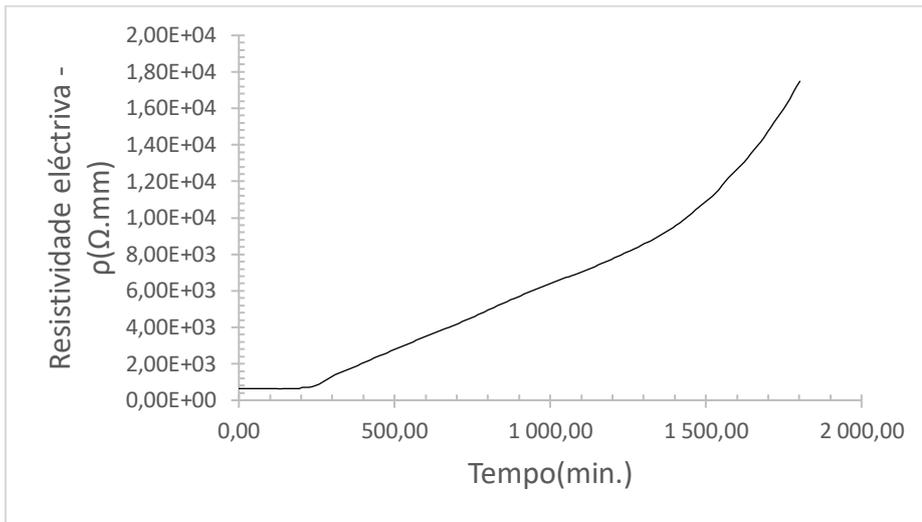


Figura 4.50 - Resistividade elétrica de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 50% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS

Neste ensaio, a resistividade elétrica está estabilizada até ao minuto 236. Após esse instante o seu aumento é gradual até ao final do ensaio.

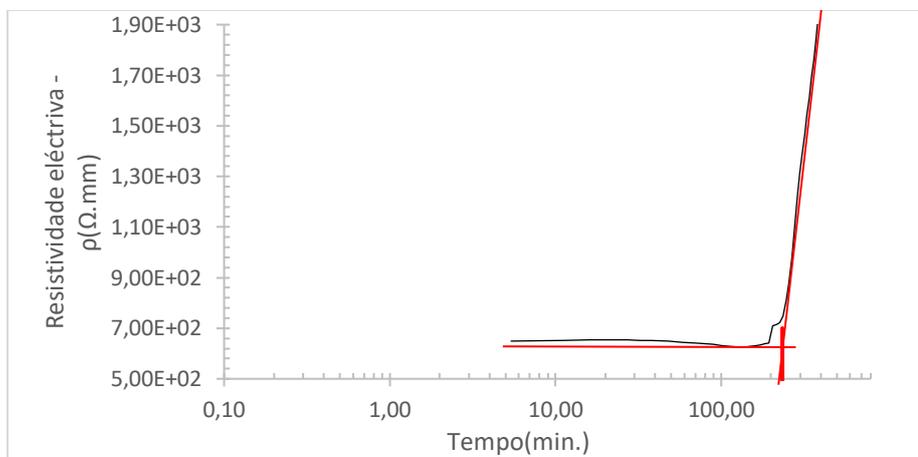


Figura 4.51 - Determinação do tempo de presa de uma pasta CEM II/A-L 42.5 R com 50% de CV, A/L de 0.35 aplicando corrente alternada em XPS

O tempo de início de presa obtido foi de aproximadamente 234 min.

Uma vez mais, o uso da adição CV nos ensaios de resistividade elétrica aplicando corrente alternada impôs uma aceleração da presa, visto que o tempo de início de presa obtido neste ensaio (figura 4.52) é bastante inferior ao ensaio homólogo (figura 4.40), mas sem aditivos.

#### 4.5. Comparação dos tempos de presa do ensaio de Vicat com os ensaios de resistividade elétrica

Depois de se ter feito os ensaios que se destinavam a determinar os tempos de presa das pastas de cimento, surge a necessidade de fazer uma comparação e fazer uma conclusão sobre o assunto.

Deste modo, visto que os cimentos que foram ensaiados no ensaio de Vicat serem com pastas de consistência normal, fez-se a comparação, na tabela 4.2, dos tempos de presa dos três ensaios (Vicat, resistividade elétrica com corrente alternada e resistividade elétrica com corrente contínua) em que foram ensaiadas pastas com consistência normal.

Tabela 4.2 – Tempos de início de presa dos ensaios realizados para as pastas CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM I 52.5 N com consistência normal

Cimento	Tempo de início de presa (min.)			
	Vicat	Corrente alternada	Corrente contínua	
			Acrílico	XPS
CEM II/B-L 32.5 N	244	175	20	95
CEM II/A-L 42.5 R	140	201	18	61
CEM I 52.5 N	205	169	26	56

Uma das conclusões que se pode retirar da comparação dos tempos de início de presa obtidos dos três ensaios, é de que os tempos de início de presa nos ensaios de corrente contínua estão desfasados dos tempos dos outros ensaios. A este fato deve-se aos efeitos de polarização presentes nos ensaios em que foi usado corrente contínua.

Quando olhamos para os resultados dos tempos de início de presa dos ensaios de resistividade elétrica de corrente alternada, podemos concluir que os tempos obtidos para as pastas de cimento CEM II/B-L

32.5 N e CEM I 52.5 N foram inferiores aos tempos de início de presa obtidos com o método de Vicat. Enquanto que para a pasta de cimento CEM II/A-L 42.5 R o sucedido foi o oposto, o tempo de início de presa com o método de Vicat foi superior ao tempo de início de presa obtido nos ensaios de resistividade elétrica com corrente alternada.

De modo a averiguar se existe uma correlação entre o método de Vicat e os ensaios em que é medido a resistividade elétrica aplicando corrente alternada e contínua, procedeu-se à criação de um gráfico “dispersão (x,y)”, com os resultados de Vicat em abcissas e os outros em ordenadas. Na figura 4.54, está representado a correlação dos tempos de inícios de presa entre o método de Vicat e o método de impedância que mede a resistividade elétrica com o uso de corrente alternada.

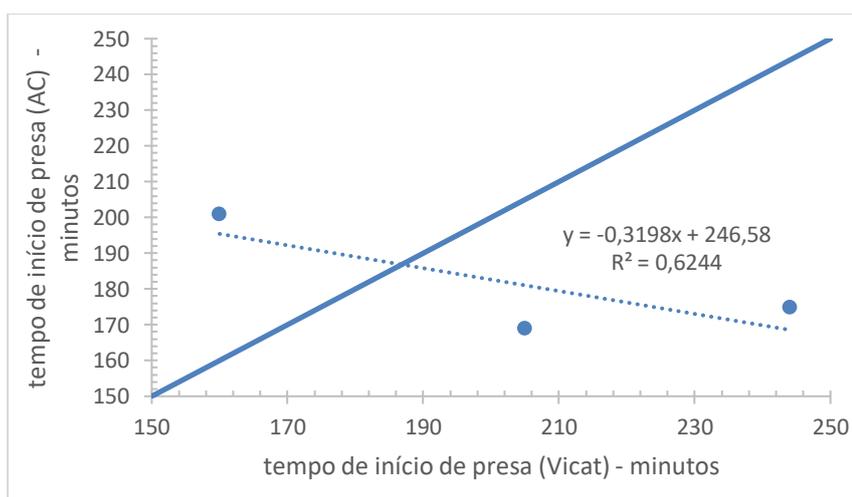


Figura 4.52 - Correlação dos tempos de inícios de presa entre o método de Vicat e o método de impedância que mede a resistividade elétrica com corrente alternada

De seguida, fez-se a correlação dos resultados dos tempos de início de presa do método de Vicat com o método expedito em que foi aplicado corrente contínua realizado no molde de XPS.

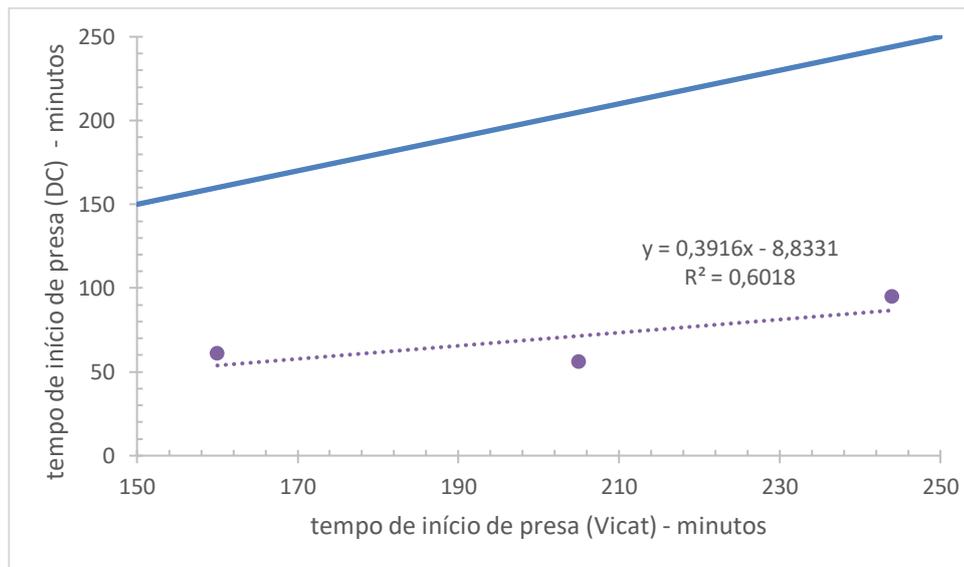


Figura 4.53 - Correlação dos resultados dos tempos de início de presa do método de Vicat com o método expedito aplicado corrente contínua num molde de XPS.

Por fim, procedeu-se à análise da correlação do método de Vicat com o método de expedito desenvolvido em que é aplicado corrente contínua, mas num molde de acrílico.

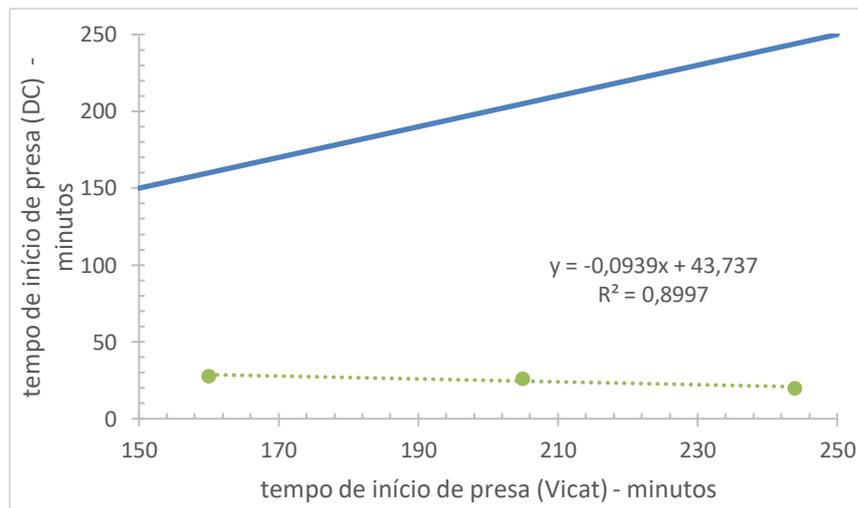


Figura 4.54 - Correlação do método de Vicat com o método de expedito desenvolvido aplicando corrente contínua num molde de acrílico

Após feita as três correlações acima expostas conclui-se que o método expedito desenvolvido com corrente contínua num molde de acrílico foi o que obteve uma maior correlação de resultados (figura 4.55).

O ensaio que se aproximou mais dos resultados do método da agulha de Vicat foi o ensaio de espectroscopia de impedância em que é aplicada uma corrente alternada (figura 4.53).

## 5. CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA A DESENVOLVER

### 5.1. Conclusões Gerais e trabalhos futuros a desenvolver

O principal objetivo desta tese de mestrado integrado passava pela construção de um aparelho de fácil uso em que as medições efetuadas fossem mais expeditas em relação ao método empírico de Vicat e, consequentemente, validar este novo método visto que o método tradicional de Vicat não tem um nenhum suporte científico e que está limitado a pastas de cimento de consistência normal sem uso de adições nem adjuvantes. Com a construção e utilização deste novo método conclui-se que uso de corrente contínua não é o mais adequado para o efeito devido aos efeitos de polarização verificados nos ensaios que provocaram uma aceleração dos tempos de presa.

Deste modo, o segundo objetivo passava por realizar ensaios em que se usasse corrente alternada e, assim, tentar validar o método. Devido à falta de sensores de corrente alternada não foi possível realizar estes ensaios no método desenvolvido, mas realizaram-se aplicando espectroscopia de impedância às pastas de cimento. Destes ensaios conclui-se que, existe uma aproximação muito razoável entre os tempos obtidos deste ensaio com o ensaio tradicional de Vicat., validando, assim, que a medição da resistividade elétrica de pastas de cimento com o uso de corrente alternada é um processo válido e que pode ser futuramente aprofundado.

A utilização do novo método que foi desenvolvido, mas com o uso de corrente alternada permitiria obter-se resultados de ensaios mais expeditos devido às características do método experimentado e, não seria necessário usar grandes quantidades de cimento em cada ensaio. Com este novo método, para cada ensaio, seria necessário, apenas, no máximo 35g de cimento, valor muito abaixo dos 300g usado no método de Vicat. Para além disso, este novo método possibilitaria abrir horizontes nos tipos de cimento a serem ensaiados, possibilitando testar cimentos com diferentes razões de água/ligante, com adições, com adjuvantes e até argamassas.

Deste modo, propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver o mesmo método, mas com o uso de um sensor de corrente alternada;
- Aplicar um sensor de temperatura nas medições com uma boa precisão para se poder averiguar a evolução deste fator ao longo dos ensaios;
- Testar pastas de cimento com outro tipo de adições bem como adjuvantes de forma a avaliar os efeitos das mesmas na medição dos tempos de presa;
- Realizar ensaios de resistividade elétrica nas pastas de cimento em que se faz variar a temperatura ambiente onde se encontra o provete;
- Executar ensaios com este método expedito para argamassas e betões.

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] – NP EN 197-1, “Cimento – Parte 1: Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos correntes”, 2001.
- [2] – A. De Sousa Coutinho, “Fabrico e Propriedades do Betão”, Volume 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.
- [3] – Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, “Lés Béton – Base et données pour leur formulation”, éditions Evrolles, troisièmes tirage, 1999.
- [4] – Secil, Companhia de Cal e Cimento, S.A. – “Qualidade, tradição e Inovação”, documento de divulgação técnica, sem data.
- [5] – A.M. Neville, “Properties of concrete”, 5th edition, Pearson Education Limited, Harlow, England, 2011, ISBN 978-0-273-75580-7. Previous published: 1963, 1973, 1975, 1977, 1981, 1985 (by Longman Group Limited).
- [6] – J. M. Makar, G. W. Chan, “End of induction period in ordinary Portland cement as examined by high-resolution scanning electron microscopy”, Journal of the American Ceramic Society, v91, n°4, April 2008, pp 1292-1299.
- [7] – M. F. Cánovas “Hormigón”, Octava Edición, Octubre 2007.
- [8] – P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, “Concrete – Microstructure, properties and materials”, 1996.
- [9] – H.F.W. Taylor, The chemistry of cement. 2st ed., Academic Pres, London 1997.
- [10] – L. Y. Gómez-Zamorano, G. Garcia-Guillén, J. L. Acevedo-Dávila,” Estudio da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes”, 2015.
- [11] - <http://www.cimporportugal.pt/cache/binImagens/XPQwjxQXX3653W1IZEWXykdZKU.pdf>, 1-07-2020.
- [12] - ARANDIGOYEN, M., BERNAL, J. P., LÓPEZ, M. B., & ALVAREZ, “Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity”, 2005.

- [13] - NP EN 196-3, “Parte 3 Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.”, 2006.
- [14] - Coutinho, J. S. “Ciências de Materiais - Ligantes e agregados.” FEUP, Porto, 2002.
- [15] - Domone, P.L. “Concrete-Constituent materials of concrete”, 1994.
- [16] - Marcos A. S. Anjos, Aires Camões, Carlos Jesus, Fernando Duarte, “Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais”, 2012.
- [17] – NP EN 12620, “Agregados para Betão”, 2004.
- [18] – NP EN 450-1+A1, “Cinzas volantes para betão, Parta 1: Definição, critérios de conformidade, 2008.
- [19] – NP EN 13263-1, “Silica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade, 2007.
- [20] – NP EN 15167-1, “Escória de alto forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1; Definições, especificações e critérios de conformidade, 2008.
- [21] - A. de Sousa Coutinho, “Fabrico e propriedades do betão”, LNEC, dezembro de 2006.
- [22] - P.C. Silva, R.M. Ferreira, H. Figueiras, “Influência da geometria e da presença de armadura em lajetas de betão na medição de resistividade elétrica”, 2012.
- [23] – NP EN 12504-4, “Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons”, 2007.
- [24] – Naik, T. R., Malhotra, V. M., Popovics, “J.S. The ultrasonic pulse velocity method”, 2004.
- [25] - Monfore, G. E., The electrical resistivity of concrete. Journal of Portland Cement Association. nº 224. p. 35-48, 1968.
- [26] - Wilson, J. B., The electrical properties of concrete. Thesis submitted to the University of Edinburgh for the degree of doctor of philosophy. Department of Electrical Engineering. Scotland, 1986.

- [27] - Zongjin, L., Xiao, L., Wei, X., Determination of Concrete Setting Time Using Electrical Resistivity Measurement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19, 423-427, 2007.
- [28] – C. Calado, A. Camões, S. Jalali, B. Barkokébas Jr, “Pesquisa do Tempo de Trabalhabilidade de Concreto Auto- Adensável através de Ensaio em Pastas”, 2015.
- [29] - C. Calado, A. Camões, S. Jalali, B. Barkokébas Jr, “COLOCAÇÃO E CURA DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL EM CLIMAS QUENTES”, 2012.
- [30] - Coutinho, A. S. “Resistência às Tensões. in *Fabrico e Propriedades do Betão*”, Volume III, pp. 1-106, LNEC, Lisboa, 1997.
- [31] - Vieira, “M. Betão. in *Ciências e Engenharia de Materiais de Construção*”, pp. 211-271, M. Clara Gonçalves and Fernanda Margarido, Lisboa, 2012.
- [32] - Martins, J. G. and Oliveira, “N. Betões - Elementos Gerais, Natureza e Qualidade”. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2005.
- [33] - Silva, P. C. F. “Resistividade elétrica e o controlo de qualidade de betão.” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2011.
- [34] - Fabiano Pereira, “Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias”, 2006.
- [35] - <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/belmetal/chapas-acrilico.pdf>, 2-07-2020.