



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de
Engenharia

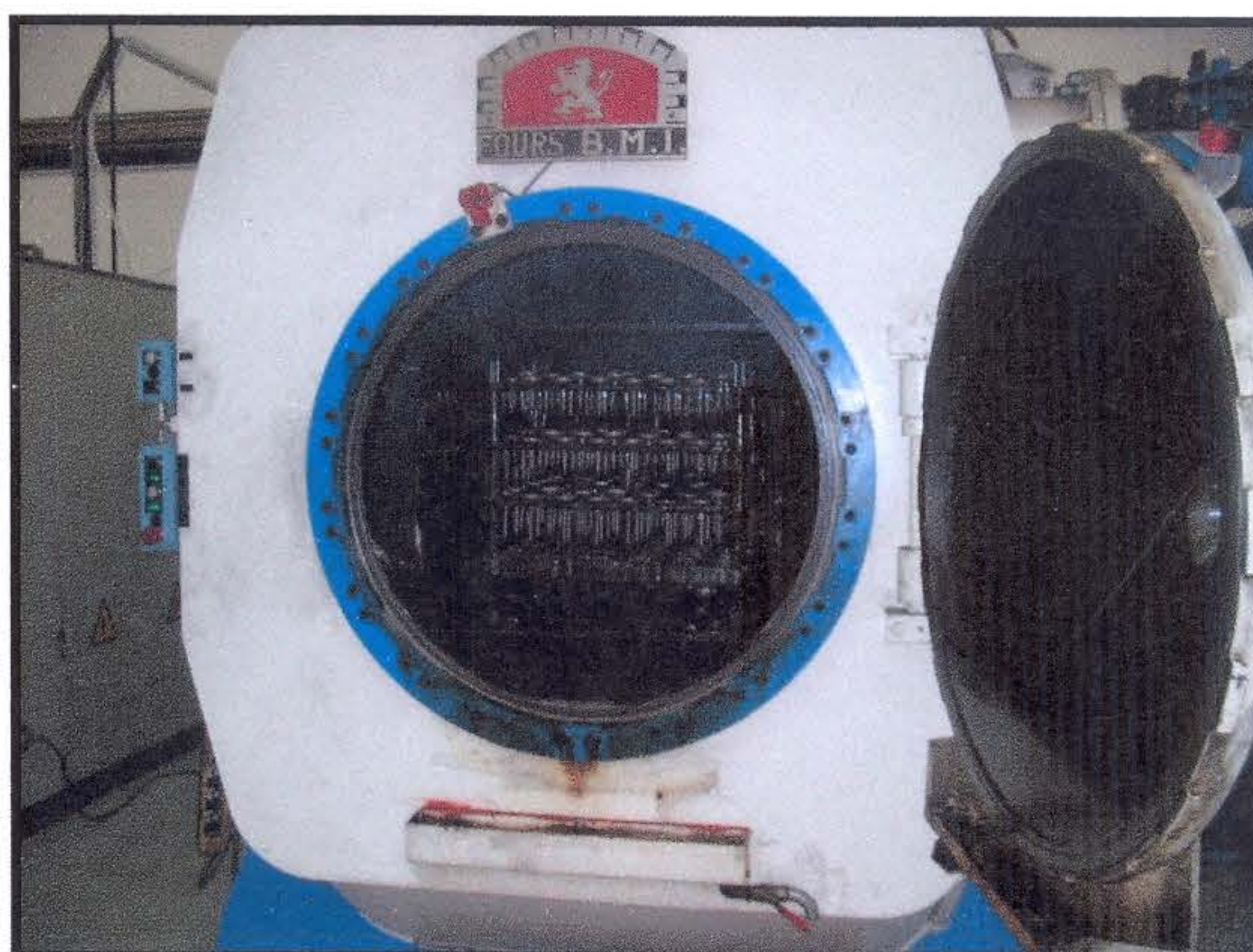
Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Relatório de Estágio

Efectuado na Empresa F. Ramada, Aços e Industrias, S.A.

Caracterização do Processo de Cementação Realizada Pelos Processos de Baixa Pressão e de Atmosfera Controlada



Realizado por:

Francisco Miguel Matos Monteiro

Orientado por:

Eng. António Paulo Duarte – F. Ramada, S.A.

Eng. Manuel Vieira – FEUP

Julho 2004



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu



Mais Educação

669 (067.3)/LEMA/1009/1009

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
100 669.1 (067.3)
100 669.1 (067.3)

AGRADECIMENTOS,

Agradeço ao meu orientador na Empresa, Eng. Paulo Duarte e ao meu orientador na Faculdade, Eng. Manuel Vieira, por terem proporcionado a realização do estágio e por todo o apoio, disponibilidade e atenção dispensada no decorrer do trabalho.

Agradeço também, às pessoas que trabalham no laboratório, nomeadamente aos senhores Brandão, Acácio e António por todo o auxílio e disponibilidade demonstrada ao longo do período de estágio.

Gostaria de agradecer também à Eng. Filomena Viana pelos esclarecimentos prestados para a execução do ensaio realizado na faculdade.

Francisco Miguel Matos de Barbosa Monteiro

Índice

1. Objectivo	3
2. Apresentação da empresa	4
3. Introdução	4
3.1. Definição do conceito de cementação. Princípio do tratamento	4
3.2. Parâmetros relacionados com o processo de cementação	5
3.3. Execução da cementação.....	6
3.4. Tratamento térmico das peças cementadas.....	7
3.5. A cementação em meio gasoso.....	10
3.6. Controlo do processo de cementação.....	10
3.7. Aços para cementação.....	12
4. Materiais e Técnicas Aplicadas	13
4.1. Procedimento experimental	14
4.1.1. Dados relativos aos fornos	14
4.1.2. Processo de cementação para amostras com diferentes diâmetros	15
4.1.3. Estudo do efeito de revenido após cementação	16
4.1.4. Cementação realizada no forno de baixa pressão	16
4.1.5. Caracterização do comportamento dos fornos ao longo de um determinado período de tempo	16
4.1.6. Caracterização da distribuição das propriedades em peças colocadas numa carga em diferentes posições	17
5. Apresentação dos resultados experimentais	18
5.1. Amostras com diferentes diâmetros	18
5.2. Amostras com diferentes temperaturas de revenido	20
5.3. Comparação entre os dois aços	23
5.4. Comparação entre os dois fornos	23
5.5. Caracterização do comportamento dos fornos ao longo de um determinado período de tempo	26
5.6. Caracterização da distribuição das propriedades em peças colocadas numa carga em diferentes posições	28
6. Conclusão	29
6.1. Amostras com diferentes diâmetros	29
6.2. Amostras com diferentes temperaturas de revenido	29
6.3. Comparação entre os fornos	30
6.4. Comportamento dos fornos ao longo dos dias	30
6.5. Caracterização de uma carga	30
7. Referências Bibliográficas	31
8. Anexos	32

Âmbito:

O estágio decorreu na área laboratorial, possibilitando a interacção com os diversos sectores da empresa e com as características de garantia da qualidade. De facto, o laboratório da empresa F.Ramada, Aços e Industrias, S.A. constitui o núcleo de relacionamento intersectorial da empresa, no que diz respeito aos aspectos técnicos dos produtos comercializados e à sua respectiva garantia de conformidade. Dada esta dinâmica de interligação, o Laboratório tem sido o local preferencial de acolhimento para os novos recursos humanos, com funções técnico-comerciais, e para estágios proporcionados a alunos provenientes de licenciaturas na área da Engenharia e de cursos de formação profissional nas áreas de Qualidade e Metalomecânica.

Atendendo às necessidades de melhoria contínua dos serviços prestados e aos meus interesses de formação, a empresa criou um plano de trabalho contendo:

- Um conjunto de tarefas de curta duração que permitiram adquirir um leque variado de conhecimentos que contribuirão para a sua valorização curricular e criam à empresa a possibilidade de receber apoio ao nível de alguns dos trabalhos de maior relevância em curso.
- Um trabalho mais detalhado sobre a caracterização do processo de cementação realizado por duas diferentes tecnologias, que a permitiu utilização prática de técnicas de controlo de qualidade com vista à implementação de documentos de qualidade.

O estágio a efectuar criou-me condições para adquirir maior competência numa futura inserção em ambiente industrial e proporcionou o contacto com tecnologias associadas ao fabrico de moldes, com práticas produtivas de tratamento térmico, de controlo de qualidade, com a promoção dos produtos e com o relacionamento humano a vários níveis hierárquicos.

1. Objectivo

Pretendeu-se proceder a uma caracterização do processo de tratamento térmico de cementação, comparando os produtos submetidos a cementação em atmosfera controlada e a cementação a baixa pressão.

Nesta etapa do trabalho, pretendeu-se:

- relacionar a espessura da camada cementada produzida num mesmo ciclo de tratamento térmico, em peças com diferentes espessuras;
- elaborar perfis de dureza desde a superfície da peça até ao seu interior;
- definir a temperatura de revenido a utilizar para satisfazer especificações diferentes para a espessura da camada cementada;
- caracterizar as propriedades obtidas após cementação durante uma produção semanal;
- caracterizar a distribuição de propriedades atingidas após cementação em peças colocadas em diferentes posições de uma carga de cementação;
- comparar o comportamento dos dois fornos relativamente à obtenção da mesma espessura de camada endurecida;

Ao longo do estágio foram também realizados vários ensaios (apresentados em anexo):

- Ultra-Sons, tendo como objectivo a implementação de novos documentos de controlo de qualidade aos produtos maquinados.
- Caracterizadas dos níveis de inclusões existentes em cinco diferentes tipos de aços utilizados na indústria dos moldes.

Assim como foram elaboradas fichas técnicas dos aços em estudo, tendo como objectivo proporcionar uma melhoria documental e dos serviços prestados.

No decorrer do período de estágio assisti a um curso de formação, que decorreu na empresa, sobre ultra-sons.

2. Apresentação da Empresa

A empresa F. Ramada, Aços e Industrias, SA, fundada em 1935, inicialmente dedicava-se à produção de fita de serra e outras ferramentas para madeira e cortiça. É a esta pequena unidade que, progressivamente, ao longo de três décadas se agregam novos negócios que têm como elemento comum o aço.

A empresa F. Ramada, é hoje uma empresa com um capital social de 15 milhões de euros e um volume de vendas consolidado de 60 milhões de euros, desenvolvendo a sua actividade em diversas áreas principais que se encontram divididas em função dos produtos e dos serviços prestados por cada uma – Aços Especiais, Aços Laminados e Estirados a Frio, Tratamentos Térmicos, Tecnologias de Corte, Sistemas de Armazenagem, Ferramentas e Laboratório.

3. Introdução:

3.1. Definição do conceito de cementação. Princípio do Tratamento.

A cementação pode ser definida como um tratamento termoquímico, que visa o endurecimento superficial de uma peça de aço, através da modificação parcial do seu teor em carbono na periferia da peça. O objectivo principal deste tratamento consiste em aumentar a dureza e resistência ao desgaste da superfície, ao mesmo tempo que o núcleo do material permanece dúctil e tenaz. ^[1]

De uma maneira geral, este tratamento consiste na introdução de carbono na superfície do aço, através do contacto com substâncias capazes de fornecer carbono livre a temperaturas adequadas, de modo a que, depois de convenientemente temperado, apresente uma superfície muito mais dura e resistente. Com este tratamento, pretende-se normalmente um teor em carbono, incorporado na superfície da peça, não superior ao eutectóide, visto que teores mais elevados facilitam a formação de redes de carbonetos, produzindo uma martensite frágil e originando uma elevada fracção de austenite residual. Este tipo de tratamento termoquímico ocorre a temperaturas que variam, normalmente, entre 900 a 950°C, durante um determinado período de tempo, sendo o tempo e a temperatura os principais parâmetros que irão determinar a espessura da camada cementada. Quanto maior for o tempo de tratamento, a temperatura constante, maior será a profundidade da camada cementada. Mantendo o tempo de tratamento constante, a profundidade da camada será tanto maior, quanto mais alta for a temperatura. O aumento do tempo é limitado à aplicabilidade industrial do processo e o aumento da temperatura é condicionado pelo crescimento do grão austenítico. ^[2]

O teor em carbono dos aços de cementação é normalmente inferior a 0,20% de carbono podendo ir até 0,25%. Após a cementação este valor atinge, na zona superficial, cerca de 0,80% podendo ir excepcionalmente até 1,10%, dependendo da qualidade do aço e o tratamento a que foi submetido. O teor em carbono vai diminuindo progressivamente da superfície para o núcleo. A peça após a cementação é temperada a partir da temperatura de têmpera prescrita, ficando a camada cementada com dureza elevada enquanto que o núcleo, cuja composição se manteve, conserva a sua tenacidade e praticamente não sofre qualquer aumento de dureza.

—→ A cementação é constituída por duas operações sucessivas: a primeira é a de enriquecimento superficial do aço (cementação propriamente dita) e a segunda é a têmpera. A primeira destas fases é constituída por dois fenómenos que se verificam simultaneamente:

- A transferência dos átomos de carbono do cimento (sólido, líquido ou gasoso) para a superfície da peça.

- A difusão do carbono da superfície para o interior da peça que consiste, portanto, numa migração dos átomos de carbono. ^[3]

3.2. Parâmetros relacionados com o processo de cementação

----- Conforme a natureza do cimento e a temperatura e tempo da reacção, a penetração (rapidez do processo) e o perfil de dureza atingível é variável. O perfil de dureza é dependente do teor em carbono local, sendo de uma forma geral, o andamento semelhante ao modo indicado na figura 1a). O teor em carbono após a cementação (carbonização) atinge, normalmente, na periferia da peça cerca de 0,8%, podendo ir a 1,10%, conforme a qualidade do aço e o tratamento a que foi submetido. No entanto, este valor vai diminuindo da periferia para o núcleo mantendo aqui um valor inferior a 0,25%, como se exemplifica na figura 1b). A habitual limitação do teor máximo em carbono na superfície das peças em 0,86%, está relacionada com o facto de que o teor excedente de carbono introduzido se traduza na formação de cementite nas fronteiras de grão. Quando se pretende obter grandes profundidades de cementação recomenda-se a realização de um recozimento intermédio para evitar a formação de cementite nas juntas de grão na parte subjacente à superfície, o que tornaria o aço frágil.

—→ No caso da têmpera directa (abordado no ponto 3.4) poderá surgir uma camada contendo austenite residual na superfície da peça, pelo que a dureza superficial será inferior à das camadas subjacentes. Para se recuperar a dureza da película superficial deve fazer-se uma têmpera posterior seleccionando a temperatura de têmpera em função da composição química da camada superficial.

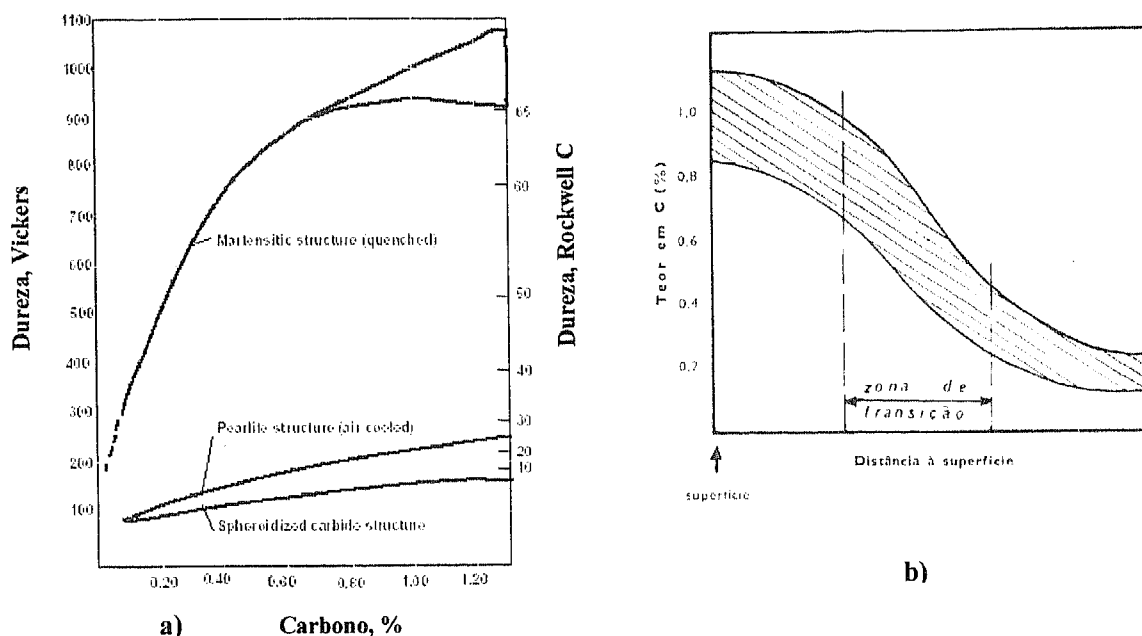


Figura 1: Variação a) da dureza em função do teor em carbono; b) do teor em carbono em função da distância à periferia, das peças cementadas ^{[2]; [3]}

Como já foi referido, o teor em carbono e a dureza após têmpera diminuem progressivamente da periferia para o interior da camada cementada. É importante então definir o conceito de profundidade de cementação, que é normalmente considerada como a camada exterior da peça na qual a dureza, após tratamento térmico, medida perpendicularmente à superfície da peça, é superior a 550 HV / 9,81 N.

Os cimentos usados podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, sendo a difusão do carbono feita sempre pela fase gasosa. De um modo geral, a velocidade de penetração é de cerca de 0,1 mm por hora na cementação em meio sólido e de 0,4 a 0,5 mm por hora na cementação em banho de sais.

O potencial de carbono de uma atmosfera é o teor em carbono que uma amostra de chapa fina de aço macio adquire após atingir o equilíbrio nessa atmosfera (determinável por anulação de aumento de massa em função do tempo ou análise química). Uma vez definido um potencial de carbono a uma dada temperatura para um determinado aço, a profundidade das capas dura e cementada ficam fixadas pela lei de Fick. ^{[2]; [4]}

3.3. Execução da Cementação:

- A execução prática de cementação pode apresentar duas diferentes formas:
- Realização do tratamento a uma temperatura constante, cujo valor depende da qualidade do aço e das condições que se desejam obter. As temperaturas utilizadas, situam-se normalmente entre 925°C a 950°C para aços em carbono ou para aços especiais pouco sujeitos à formação de carbonetos; e temperaturas que variam desde 875°C a 925°C para

aços com forte teor em crómio-manganês, nos quais é possível o aparecimento de uma rede de cementite.

- Um aquecimento realizado a uma temperatura elevada, seguido de uma difusão a temperatura mais baixa (800°C a 850°C), com o objectivo de reduzir o teor superficial para um valor próximo do teor eutectóide. Neste caso, obtêm-se cementações mais perfeitas, no entanto as operações são sensivelmente mais prolongadas. [5]

3.4. Tratamento térmico das peças cementadas

As peças cementadas podem ser submetidas a vários tipos de tratamento. Após cementação, a peça passará a ser constituída por “duas” qualidades de aço. À superfície o aço possui 0,8 a 1,1% de carbono, enquanto que no núcleo o teor em carbono do aço ronda os 0,25% no máximo. Consequentemente, existem duas temperaturas de têmpera diferentes, uma para cada uma das zonas da peça, uma vez que o ponto de transformação A_{c3} é diferente (mais elevado para o núcleo).

Têmpera directa a partir da temperatura de cementação:

Neste tratamento, as peças são sujeitas a têmpera imediatamente após a cementação (sem passagem pela temperatura ambiente entre as duas etapas), à temperatura à qual foi realizada esta operação. Este método é aplicado de preferência após cementação em meios líquidos ou gasosos. O arrefecimento pode ser efectuado em água (cerca de 20°C), em óleo (entre 50-60°C) ou em banho quente com arrefecimento final ao ar ambiente. A figura 2 seguinte representa este procedimento.

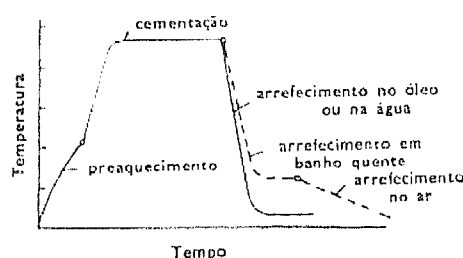


Figura 2 – Têmpera directa a partir da temperatura de cementação [3]

Conforme os casos em análise, poder-se-á antes do arrefecimento brusco de têmpera, baixar a temperatura da peça a partir da temperatura de cementação até uma temperatura superior à temperatura A_1 . Então, proceder-se-á ao arrefecimento de têmpera. Tal processo provocará, naturalmente menores variações dimensionais. Aliás é com a têmpera directa que se verificam menores variações dimensionais comparativamente a todos os restantes processos.

Dada esta vantagem, é natural que este tratamento seja aplicado sempre que possível. Para este procedimento, é conveniente utilizar aços com teores pequenos em crómio, assim

como, dada a tendência para o aumento do tamanho de grão da austenite devido à temperatura de cementação ser uma temperatura de têmpera elevada, se deve utilizar aços com grão fino.

Após cementação não se deve proceder a outra maquinagem que não seja a rectificação final. No entanto, no caso da têmpera directa, se não for possível evitar a maquinagem de uma certa zona, deve proteger-se tal zona para não ser carborada. Esta acção evita que esta região, por têmpera, adquira uma dureza elevada que iria dificultar a sua maquinagem.^[3]

Têmpera simples:

Neste processo as peças são arrefecidas após cementação, verificando-se a transformação da austenite, seguindo-se um novo aquecimento à temperatura de têmpera, no qual se forma novamente austenite. Estas transformações da austenite originam a formação de uma estrutura de grão fino. A temperatura de têmpera deve ser, de preferência, a relativa ao aço do núcleo. É possível proceder a uma maquinagem após o arrefecimento depois da cementação, efectuando um recozimento intermédio. Para o caso das peças serem propícias a deformações, devido a uma geometria desfavorável (por exemplo secção variável) deverá proceder-se ao aquecimento em degraus para evitar deformações exageradas, especialmente no caso da têmpera em banho de sais. Como a deformação na têmpera dupla, mesmo com recozimento intermédio, é sempre maior que a verificada na têmpera simples, emprega-se preferencialmente a têmpera simples com regeneração do núcleo da peça.

Existem diferentes hipóteses de tratamento por têmpera simples após cementação, conforme se indica na figura 3.

- *Têmpera simples sem regeneração total do grão do núcleo:*

Após cementação por meio de pó deixa-se arrefecer as peças na caixa de cementação. Em seguida, elas são aquecidas à temperatura de têmpera correspondente à camada superficial (têmpera simples) e são arrefecidas em água, em óleo ou em banho quente, conforme a qualidade do aço. Por este método de têmpera o grão do núcleo só é regenerado parcialmente não sendo a camada superficial sobreaquecida. A deformação nestes casos é mínima, pelo que este processo está indicado para peças com contornos delicados.

- *Têmpera simples com regeneração do grão do núcleo:*

Esta têmpera difere da têmpera simples sem regeneração do grão do núcleo, no facto de ser efectuada à temperatura de têmpera correspondente ao núcleo da peça.

A camada cementada apresenta um grão ligeiramente mais grosseiro enquanto que o núcleo apresenta características mecânicas equivalentes às obtidas por têmpera dupla.

- *Têmpera simples com recozido intermédio:*

Quando se pretende uma deformação mínima na têmpera, as peças cementadas devem, depois de arrefecidas na caixa de cementação, ser submetidas a um recozido intermédio antes de serem temperadas. O recozido intermédio oferece a possibilidade de maquinar as peças antes da têmpera final.

- *Transformação isotérmica e têmpera simples:*

É um processo que se utiliza após cementação gasosa ou líquida. No caso das peças necessitarem de ser maquinadas após cementação o arrefecimento após a transformação isotérmica far-se-á ao ar ambiente. A figura 4 apresenta um esquema do processo.

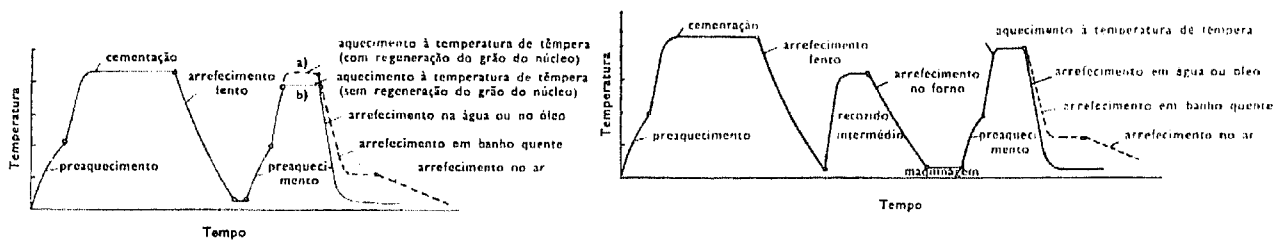


Figura 3 - Hipóteses de tratamento por têmpera simples de peças cementadas: com regeneração do grão do núcleo (à esquerda); sem regeneração do grão do núcleo (à esquerda); com recozido intermédio (à direita).^[3]

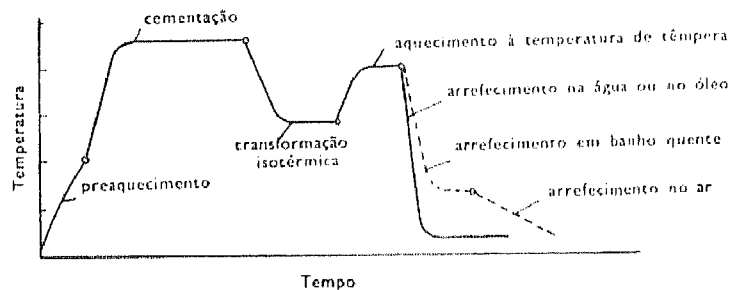


Figura 4 – Transformação isotérmica e têmpera simples^[3]

- *Têmpera dupla:*

Este processo aplica-se quando se exige um máximo de tenacidade e de dureza das peças. Para tal deixam-se as peças a arrefecer na caixa após cementação e temperam-se, pela primeira vez, à temperatura superior indicada para a têmpera dupla (temperatura de têmpera relativa ao núcleo) e pela segunda vez à temperatura inferior indicada (temperatura de têmpera relativa à periferia, que se encontra entre A_{c3} e A_{c1} do núcleo).

Este processo aplica-se de preferência às peças que devam apresentar, também na camada superficial, um grão fino, assim como qualidades particulares. A prática demonstrou que as vantagens trazidas pela têmpera dupla não compensam os seus inconvenientes

relativamente à têmpera simples à temperatura de têmpera do núcleo. Na realidade, a têmpera dupla origina variações dimensionais bastantes maiores que a têmpera simples pelo que quase não se aplica. [3], [4]

- **Revenido:**

A operação de revenido, que deve ser efectuada após a têmpera das peças cementadas, tem como objectivo principal o aumento da tenacidade das peças e redução de tensões superficiais. Com efeito, este tratamento deve reduzir as tensões internas provocadas pela martensite tetragonal mas de maneira a não conduzir a um relaxamento exagerado. Na verdade, pretende-se que subsista um estado de tensão essencialmente de compressão na zona superficial da camada exterior.

A temperatura de revenido encontra-se normalmente entre 140 a 200°C para os aços de liga e entre 150 e 180°C para os aços sem liga.

O revenido facilita o trabalho de rectificação e diminui a possibilidade de aparecimento de fissuras de rectificação nas peças cementadas, exactamente em virtude do alívio de tensões que lhe é inerente.

Em relação ao abaixamento da dureza pelo efeito do revenido, ele será de aproximadamente 2 HRC a estas temperaturas podendo ir até 4 HRC em casos extremos. De qualquer modo o revenido deve efectuar-se, sobretudo se as peças forem posteriormente rectificadas. [3]

3.5. A cementação em meio gasoso.

Na cementação em meio gasoso, as atmosferas podem ser geradas por combustão incompleta de hidrocarbonetos, produzindo-se deste modo um gás endotérmico ou por decomposição de líquidos orgânicos oxigenados.

No primeiro caso, procede-se à combustão incompleta de um hidrocarboneto no exterior do forno de cementação, gerando-se uma mistura rica em CO e H₂.

No segundo caso, injectam-se no forno de cementação líquidos orgânicos diluídos (vulgarmente em azoto) a alta temperatura, verificando-se a sua decomposição que origina atmosferas ricas em CO e H₂.

A cementação requer a injeção no forno de um suplemento de hidrocarboneto para levar o potencial de carbono ao valor pretendido, dado que o potencial de carbono da atmosfera gerada é insuficiente. [2]

3.6. Controlo do processo de cementação.

O processo de cementação é controlado pela reacção química de adsorção do carbono na superfície da peça e pela sua difusão para o interior da peça. A difusão do carbono para o

interior da peça pode ser interpretada pela segunda lei de Fick, traduzida pela seguinte fórmula:

$$(c_x - c_0) / (c_s - c_0) = 1 - \text{erf} [(x / (2 \sqrt{Dt}))]$$

No qual c_x , c_0 , c_s representam, respectivamente, as concentrações em carbono à distância x da periferia, inicial e na periferia; erf a função de erro de Laplace, cujo valor está tabelado; x a distância à periferia, t o tempo de cementação, expresso em segundos e D a difusividade do carbono na austenite, que é dada por:

$$D = D_0 \cdot \exp (-Q/RT)$$

Ou, substituindo os valores das constantes:

$$D = 0,21 \cdot \exp [-33800 / (1,987 \times T)],$$

Com D expresso em $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e T (temperatura) na escala absoluta.

Uma vez definido um potencial de carbono, a uma dada temperatura, para um determinado aço, a profundidade das capas dura e cementada ficam fixadas pela lei de Fick. A figura 5 mostra a dependência entre o perfil da concentração em carbono num aço sem liga e a duração da cementação.

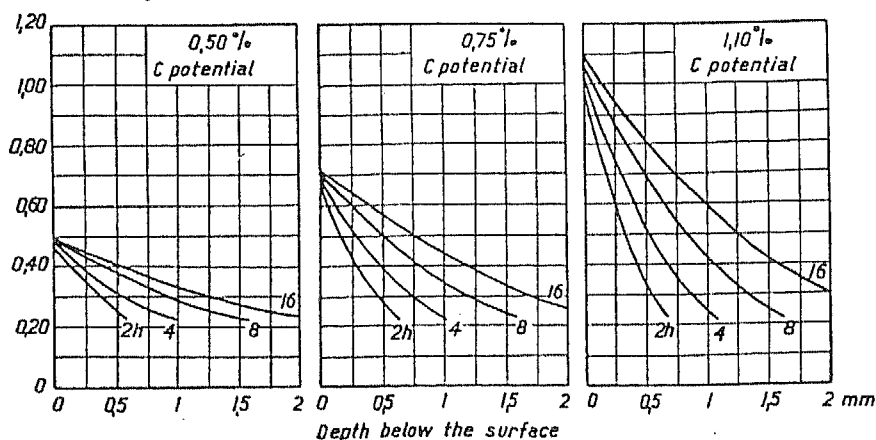


Figura 5 – Perfil de concentração em carbono da capa dura em função do potencial de carbono e da duração da cementação para um aço sem liga tratado a 920°C [7]

A figura 6 apresenta a informação recolhida a partir de cementações em meio sólido, líquido e gasoso realizadas sobre aços ligados com espessuras até 50 mm, temperados em óleo e aços não ligados com espessuras até 100 mm temperados em água; o que permite uma previsão das condições de cementação de um dado valor de capa dura. Os dados da figura foram usados para validar a expressão da segunda lei de Fick: $x = K \times \sqrt{t}$, sendo x a espessura da capa dura, expressa em mm, k uma constante e t a duração de cementação expressa em horas. Os valores da constante foram determinados para várias temperaturas,

assumindo o valor de 0,34 a 875°C, 0,41 a 900°C e 0,52 a 925°C nas unidades referidas (mm . h^{-1/2}). [2]

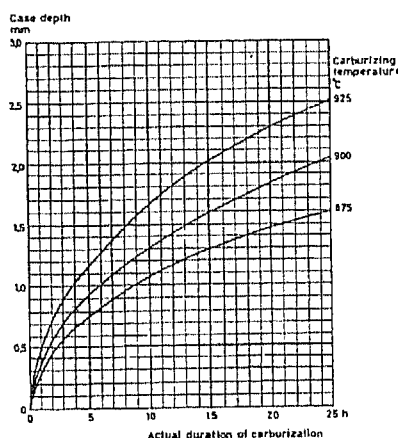


Figura 6 – Espessura da capa cementada em função da duração e temperatura de cementação [7]

3.7. Aços para Cementação:

De um modo geral, todos os aços podem ser cementados, mas em geral este tratamento restringe-se aos tipos de aços cujo teor em carbono está compreendido entre 0,10% a 0,25%. No entanto, estes aços apresentam alguns inconvenientes, como por exemplo: a facilidade de sobreaquecimento (o que origina grande instabilidade estrutural), a tensão de rotura é inferior a 60Kg/mm² e a necessidade de temperar em água, para se obter uma dureza máxima à superfície, o que origina grandes deformações.

Para o caso dos aços especiais, já não se verificam os inconvenientes descritos anteriormente, visto serem temperados a baixas velocidades de arrefecimento e apresentarem resistências elevadas e uma resiliência aceitável. Os tipos de aço especiais, crómio-molibdénio e níquel-crómio-molibdénio são os mais utilizados.

Os aços sem liga são os que permitem obter valores mais elevados da dureza (64-67 HRC) mas não apresentam tão boa resistência ao desgaste como os aços com liga. Deste modo, a partir de determinado valor do teor de um determinado elemento de liga, quanto maior for o teor deste elemento de liga mais difícil é a penetração do carbono. Portanto, os aços sem liga são os mais fáceis de cementar.

Como exemplo, apresentam-se alguns valores correspondentes ao limite do teor do elemento de liga a partir do qual a absorção do carbono se torna mais difícil, diminuindo mesmo: Cr – 1,5%; Ni – 4,0%; Mn – 1,5%; Mo – 0,5 a 0,7%. Esta dificuldade torna-se mais evidente à medida que a temperatura de cementação aumenta. A presença do Mo tem efeito benéfico, pois enquanto que os carbonetos de crómio se localizam na camada superficial, tornando o aço frágil, os carbonetos de molibdénio não tornam o aço frágil. Com efeito,

sobretudo se o teor em crómio for superior a 1,5%, dada a grande afinidade do crómio com o carbono para a formação de carbonetos, o crómio combina-se com o carbono do interior dos grãos para formar carbonetos, e acaba por formar compostos que precipitam nas juntas dos grãos tornando o aço mais frágil. A presença de níquel possibilita, em particular, a redução da temperatura de têmpera, o que diminui as deformações e evita o sobreaquecimento, permitindo temperar as peças directamente á saída do forno de cementação.

O manganês não forma carbonetos, encontrando-se dissolvido na matriz à qual confere um aumento de resistência. O manganês baixa os pontos de transformação A_{r3} e A_{r1} e diminui consideravelmente a velocidade crítica de têmpera, facilitando assim bastante a penetração de têmpera. Aumenta o limite elástico e a resistência à tracção. [3]; [6]

4. Materiais e Técnicas aplicadas:

Para a caracterização do processo de tratamento térmico de cementação, foram utilizados dois tipos de aços de cementação: o aço G15 e o aço RMC16. Os fornos utilizados no processo estão representados nas figuras 8 e 9.

Estes tipos de aços têm como principais aplicações: engrenagens de todos os tipos, casquilhos, cavilhas, rótulas de direcção, excêntricos, árvores de torno, cambotas, etc.

Os critérios para a determinação da espessura de camadas endurecidas tiveram como base a norma NP – 2413.

As tabelas 1 e 2 apresentam as principais características dos materiais utilizados, na figura 7 estão representadas as microestruturas da matéria-prima utilizada no trabalho.

Tabela 1: Classe e designação dos materiais estudados

Classe	Marca	Normas			
		EN 10083-2	ASTM	AFNOR	UNI
Aços de Cementação	G15	15 NiCr 13	3415	12 NC 15	14 NiCr 14
	RMC16	16 MnCr 5	5115	16 MC 5	16 MnCr 5

Tabela 2: Composição química dos materiais estudados:

Marca	Composição Química						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
G15	0,14–0,20	≤ 0,40	0,40–0,70	0,60–0,90	3,00–3,50	≤ 0,035	≤ 0,035
RMC16	0,14–0,19	≤ 0,40	1,00–1,30	0,80–1,10		≤ 0,035	≤ 0,035

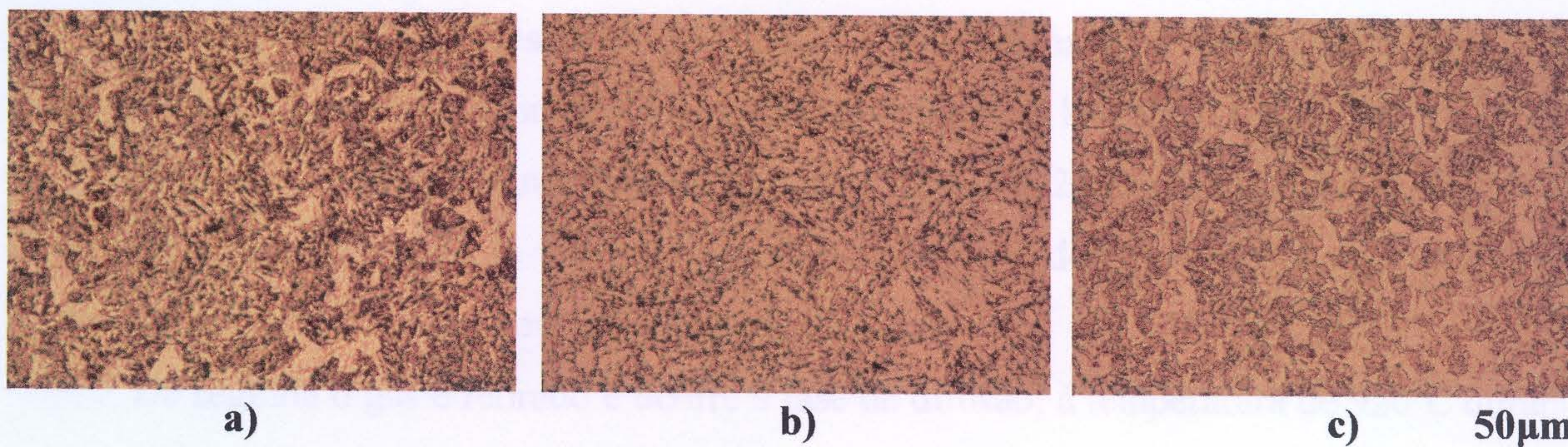


Figura 7: Microestrutura da matéria – prima: a) Aço RMC16, Laminado a Quente; b) Aço G15, Laminado a Quente; c) Aço RMC16, Estirado a Frio. Constituído por ferrite e perlite.

4.1. Procedimento Experimental:

Como já foi referido, o processo de cementação foi realizado em dois fornos diferentes, representados nas figuras seguintes.



Figura 8 : Imagem do forno de atmosfera controlada: KOS



Figura 9 : Imagem do forno de Baixa pressão: B64 THC

4.1.1. Dados relativos aos Fornos:

► Cementação Realizada no Forno de Atmosfera controlada – “KOS”:

O tratamento realizado neste forno teve um tempo total de aproximadamente 9 horas.

A primeira fase foi o aquecimento do forno até atingir a temperatura de 920°C, a esta mesma temperatura as peças foram sujeitas a um estágio durante 5 horas.

O potencial de carbono no forno é cerca de 1,05%, no entanto na altura do tratamento de têmpera baixa para 0,8%. No interior do forno a composição gasosa é constituída por Propano, Metanol e Azoto.

A fase da difusão ocorreu à temperatura de 870°C, durante 60 minutos, seguindo-se o tratamento de têmpera (à mesma temperatura) que teve a duração de 30 minutos.

Por fim as peças foram arrefecidas em óleo à temperatura de 60°C.

► Cementação Realizada no Forno de Baixa Pressão – “B64 THC”:

O tempo total de tratamento foi de aproximadamente 9 horas.

Primeiro as peças foram sujeitas a um estágio durante 2 horas à temperatura de 940°C. Após este estágio e à mesma temperatura, decorreu a fase de cementação, onde ocorreu a entrada de etileno, esta etapa teve a duração de 90 minutos.

De seguida o gás é retirado e ocorre a fase de difusão, à temperatura de 920°C durante aproximadamente 1 hora e 45 minutos. Após difusão as peças foram sujeitas a um estágio à temperatura de 850°C durante 60 minutos.

Por fim as peças foram arrefecidas em óleo à temperatura de 60°C.

4.1.2. Estudo do processo de cementação para amostras com diferentes diâmetros:

Neste caso, a cementação foi realizada no forno de atmosfera controlada (Forno “KOS”). Para tal foram utilizadas dez amostras, cinco para cada tipo de aço, com diferentes diâmetros. Antes de se iniciar o tratamento térmico de cementação, as amostras foram sujeitas a uma operação de torneamento, de modo a obter o diâmetro pretendido, numa superfície maquinada. Na tabela 3, apresentam-se as dimensões das amostras antes e após torneamento:

Tabela 3: Dimensões da Matéria-Prima

Diâmetro Inicial (mm)		Diâmetro Final (mm)
G15	RMC16	G15 e RMC16
80	80	78
65	55	53
25	25	24
20	17	15



Figura 10 : Aspecto das amostras antes de serem torneadas (à esquerda), e após torneamento (à direita)

Na figura 11 está representada a carga onde foram incluídas as amostras. Nesta etapa do trabalho as amostras não foram sujeitas a tratamento de revenido. Após cementação e têmpera as amostras foram cortadas e identificadas, de modo a proceder-se à elaboração dos perfis de dureza e determinação das espessuras das camadas superficiais endurecidas.

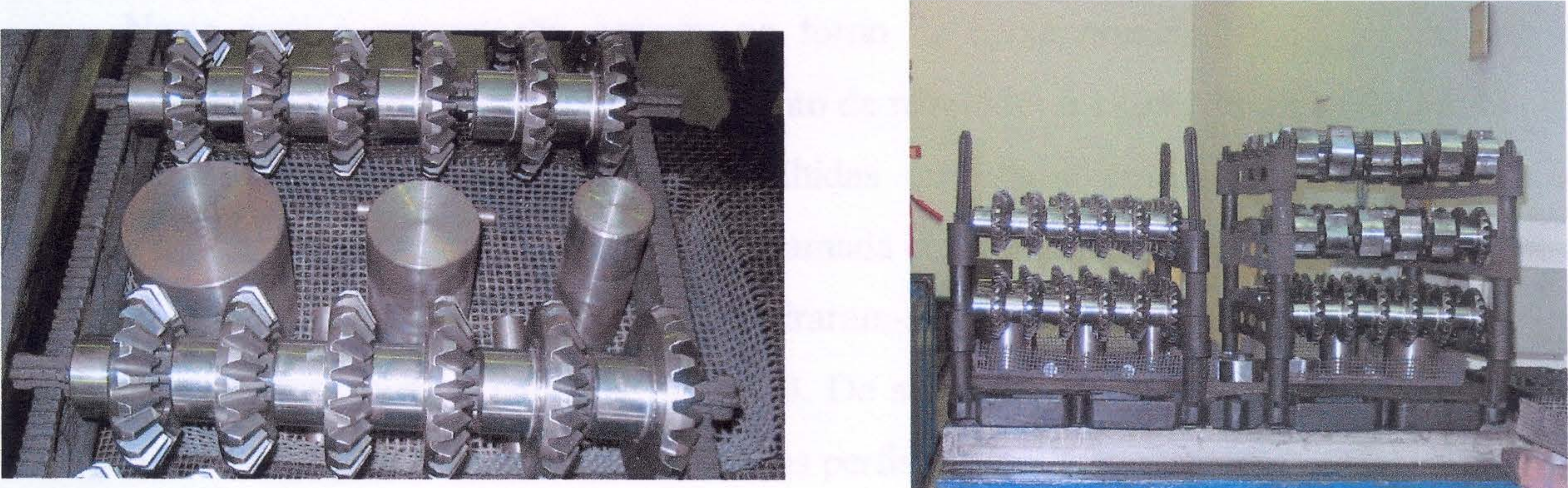


Figura 11 : Carga preparada para o processo de cementação no forno “KOS”

4.1.3. Estudo do efeito de revenido:

As amostras foram cementadas no forno de atmosfera controlada. Foram utilizadas duas amostras de 24mm de diâmetro, uma referente ao aço G15 e outra ao aço RMC16.

Após cementação procedeu-se ao corte e identificação das amostras, que posteriormente foram sujeitas a tratamento de revenido. O estudo foi realizado para cinco diferentes temperaturas, conforme se indica na tabela 4.

Tabela 4: Dados relativos ao tratamento de revenido

Temperaturas de revenido (C°)				
180	200	250	300	350
Provete de ensaio: Ø 24mm		Número total de amostras: 5 G15 + 5 RMC16		
Tempo de estágio: 1 hora				

4.1.4. Cementação realizada no forno de Baixa Pressão:

O objectivo desta etapa seria comparar os processos de cementação nos dois fornos, utilizando amostras com igual diâmetro e as mesmas especificações de espessura de camada cementada. Para tal, foram aplicadas as amostras com 24 mm de diâmetro, para os dois tipos de aços em estudo.

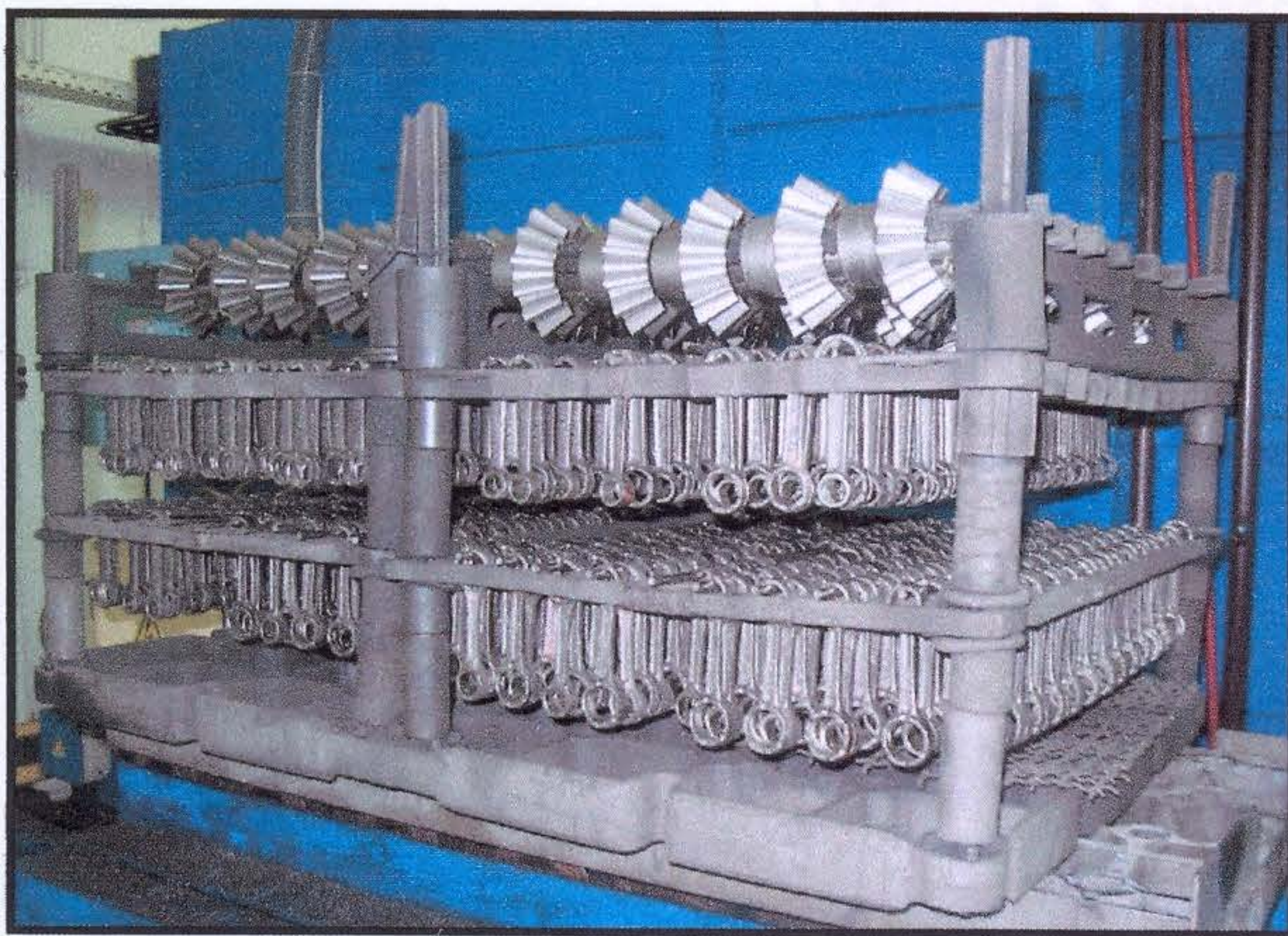
4.1.5. Caracterização do comportamento dos fornos ao longo de um determinado período de tempo: Ensaio de Repetibilidade.

Para este estudo apenas se utilizou o tipo de aço RMC16, com diâmetro de 17 mm e os tratamentos foram realizados em ambos os fornos. Preparam-se dez amostras (cinco para cada

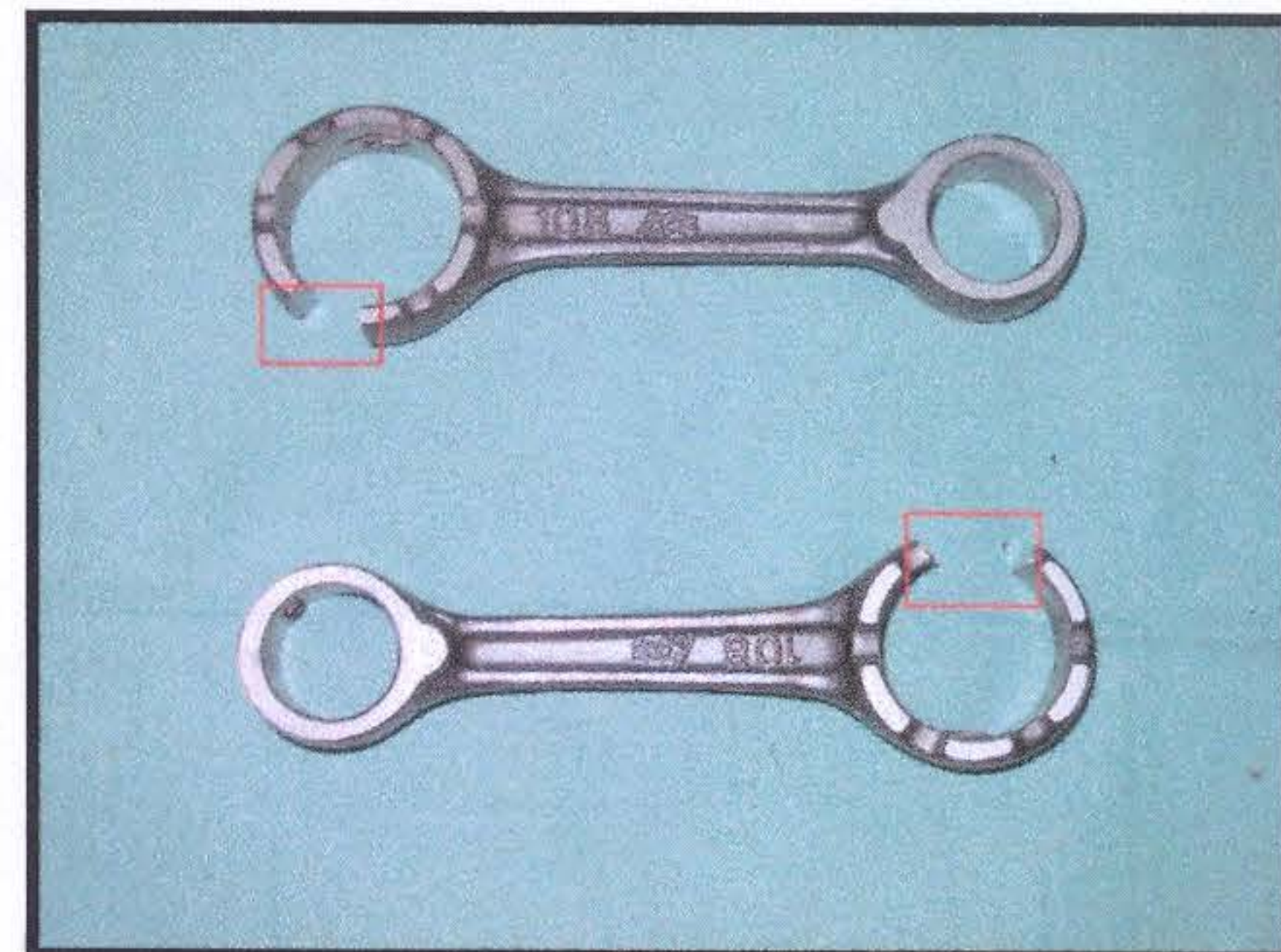
forno) e procedeu-se ao tratamento de cementação em cinco dias diferentes, com o objectivo de registar a evolução da espessura da camada cementada ao longo dos diferentes dias.

4.1.6. Caracterização da distribuição das propriedades de peças colocadas numa carga em diferentes posições:

Neste caso a cementação ocorreu no forno de baixa pressão. Após cementação e têmpera, as peças foram sujeitas a um tratamento de revenido: a 180°C durante 30 minutos. O objectivo seria verificar se as bielas escolhidas correspondiam às especificações pré-estabelecidas, ou seja, se apresentavam uma camada cementada com espessuras situada entre 0,90 mm e 1,20 mm. Após o tratamento retiraram-se sete bielas situadas numa carga em diferentes posições, representadas na figura 13. De seguida procedeu-se ao corte das bielas, exemplificado na figura 12b), e realizaram-se os perfis de dureza para cada uma das peças.



a)



b)

Figura 12: a) Carga composta por bielas; b) Zona de corte das Bielas

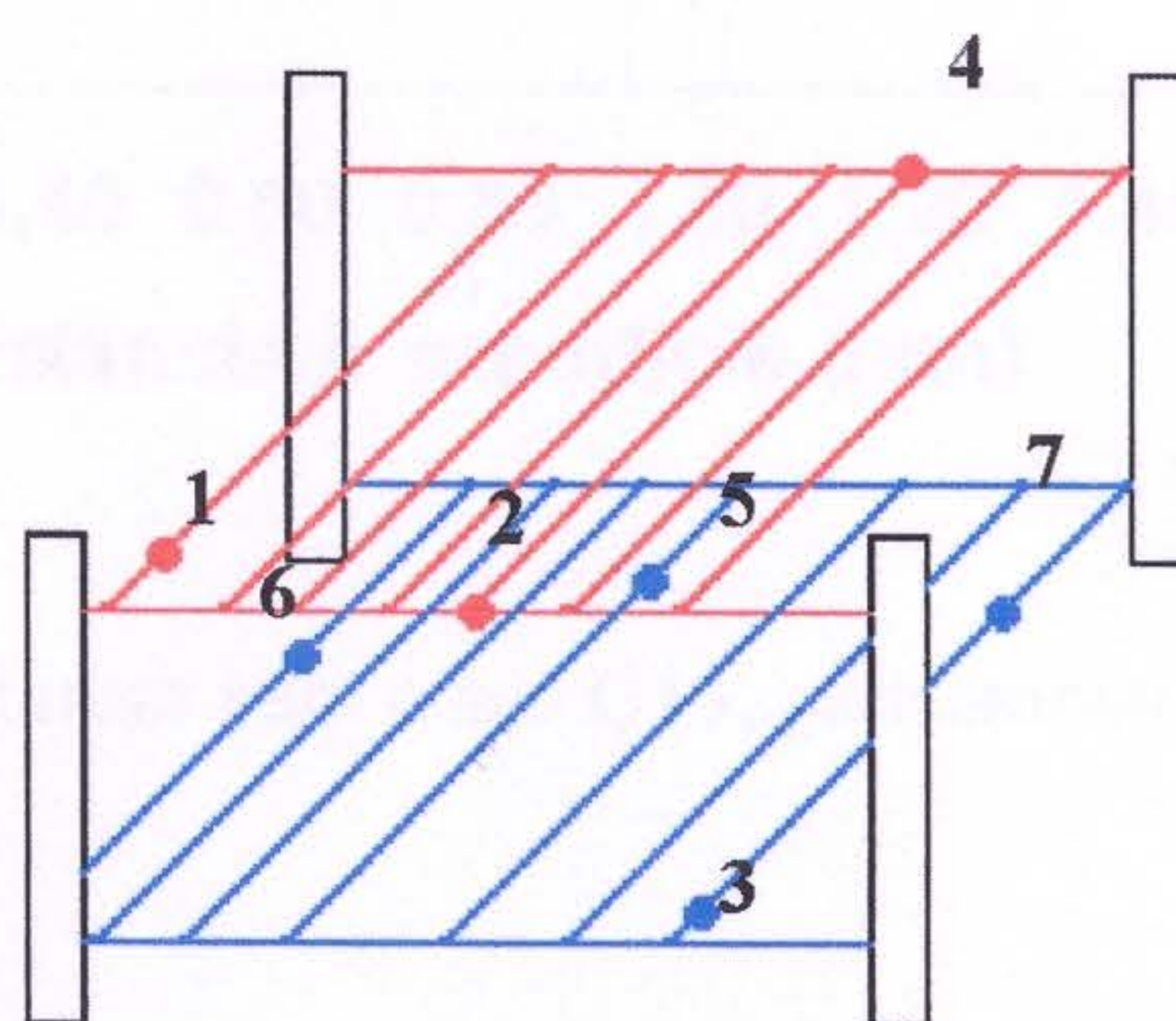


Figura 13: Representação esquemática das posições das sete bielas escolhidas para o estudo

5. Apresentação dos Resultados Experimentais

5.1. Amostras com diferentes diâmetros

Aço RMC 16

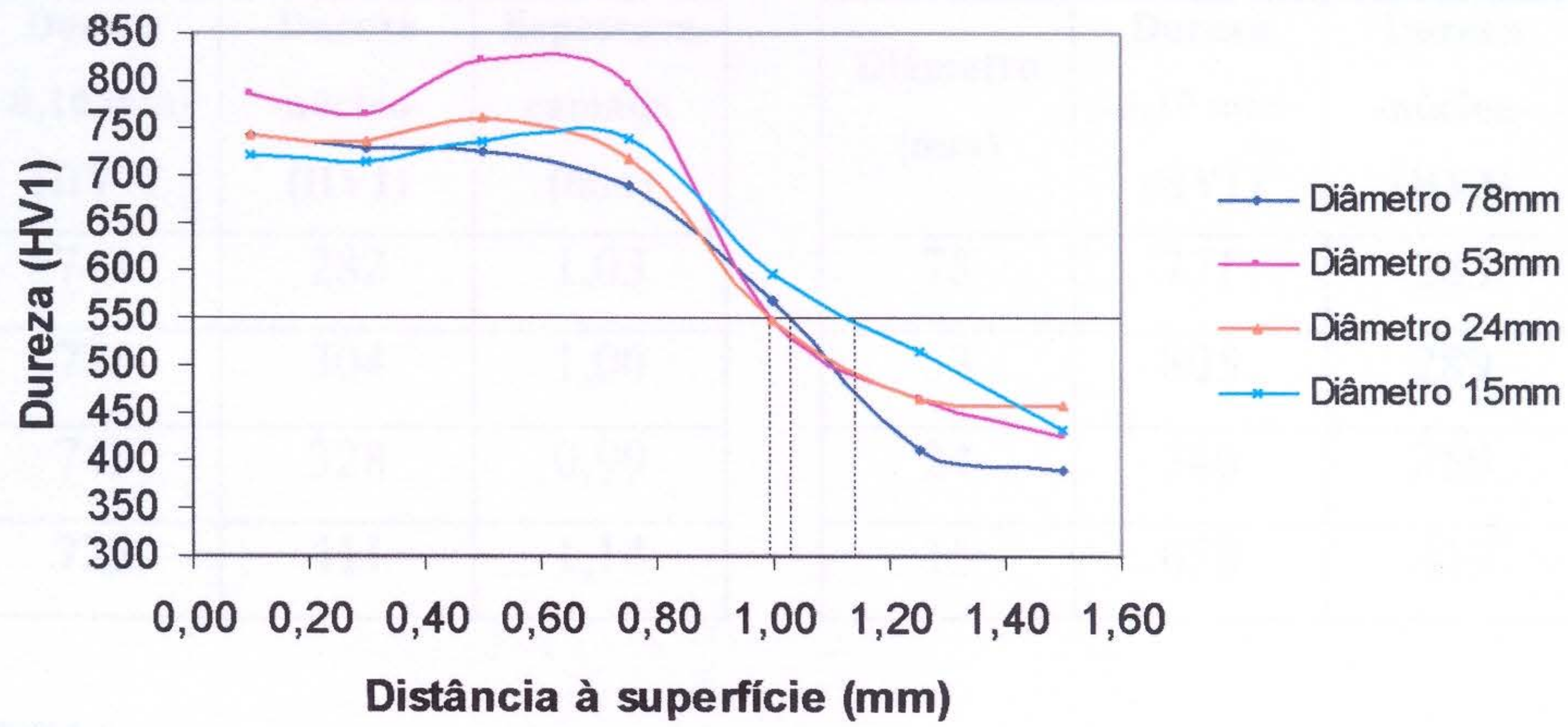


Gráfico 1 – Perfis de dureza para o aço RMC16, para amostras com diferentes diâmetros.

Aço G15

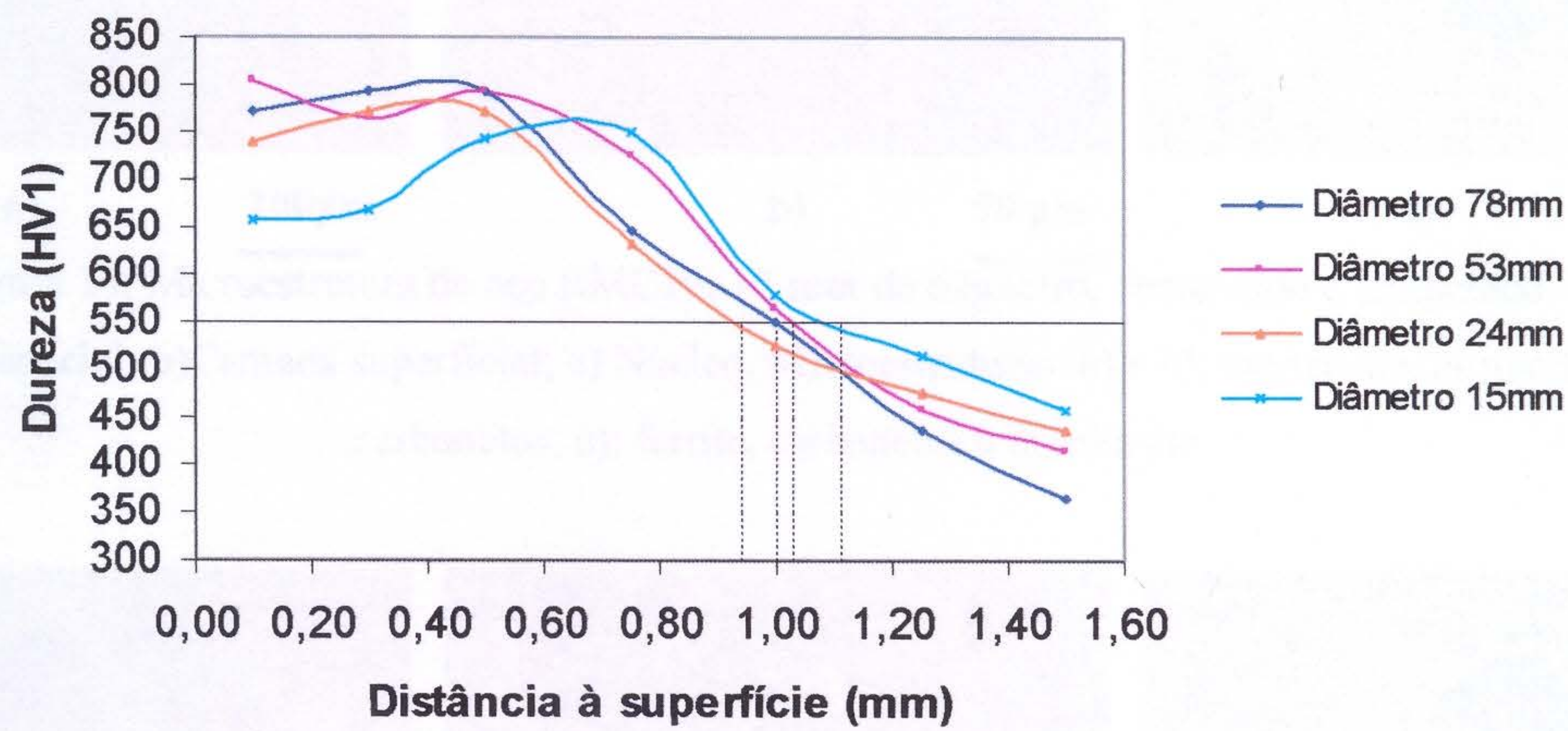


Gráfico 2 - Perfis de dureza para o aço G15, para amostras com diferentes diâmetros.

Tabela 5 – Valores de dureza e da espessura da camada cementada, para cada um dos aços em estudo

Aço RMC 16				Aço G15			
Diâmetro (mm)	Dureza -0,10 mm- (HV1)	Dureza -núcleo- (HV1)	Espessura camada (mm)	Diâmetro (mm)	Dureza -0,10 mm- (HV1)	Dureza -núcleo- (HV1)	Espessura camada (mm)
78	744	282	1,03	78	771	283	1,00
53	785	304	1,00	53	805	289	1,03
24	743	328	0,99	24	740	359	0,94
15	722	411	1,14	15	658	419	1,11

► **Aço RMC16**

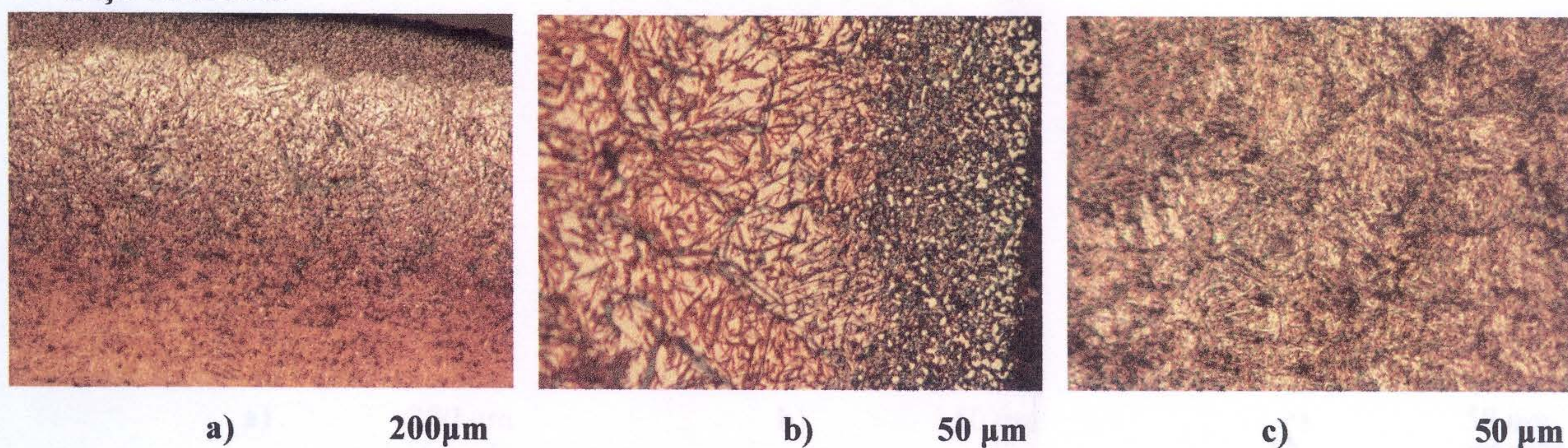


Figura 14: Microestrutura do aço RMC16, 15 mm de diâmetro, cementado e temperado: a) Camada superficial; b) Camada superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e martensite

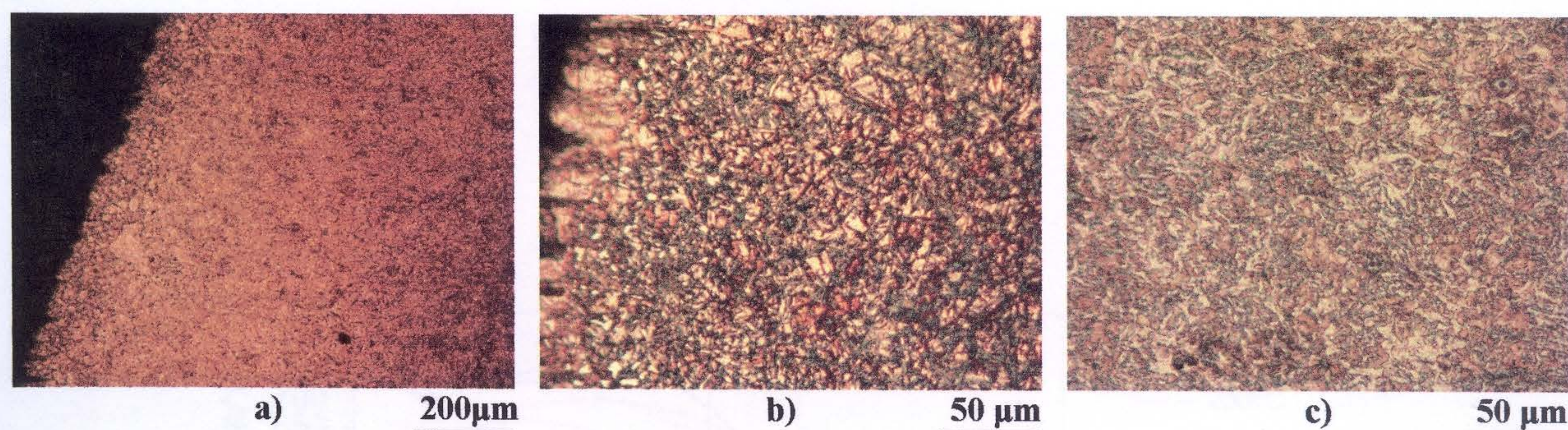


Figura 15: Microestrutura do aço RMC16, 78 mm de diâmetro, cementado e temperado: a) Camada superficial; b) Camada superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite.

► Aço G15

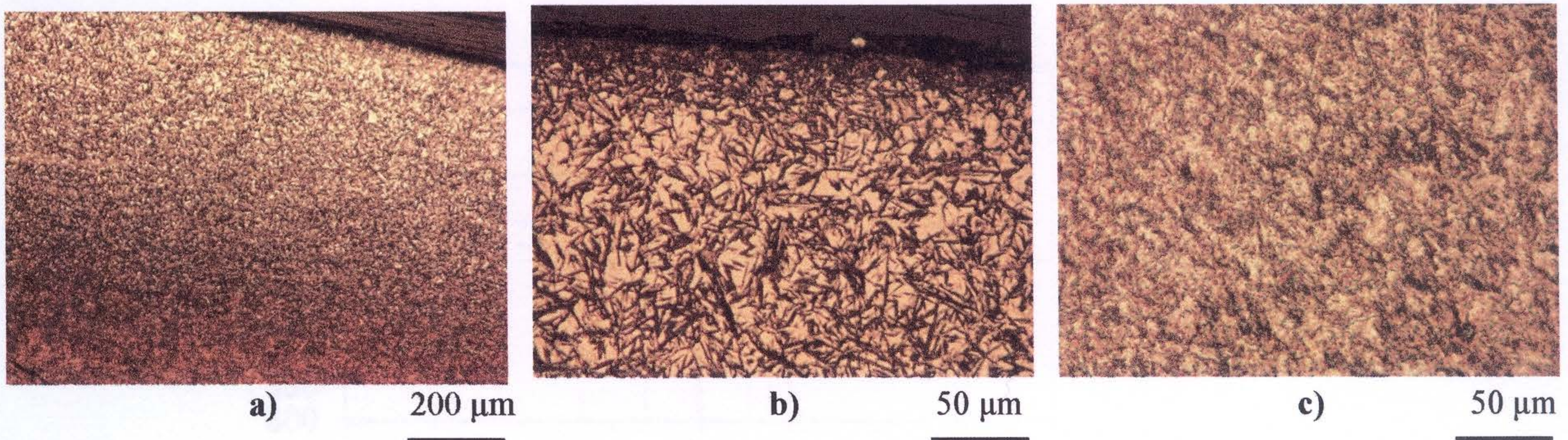


Figura 16: Microestrutura do aço G15, 15 mm de diâmetro, cementado e temperado: a) Camada superficial; b) Camada superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e martensite.

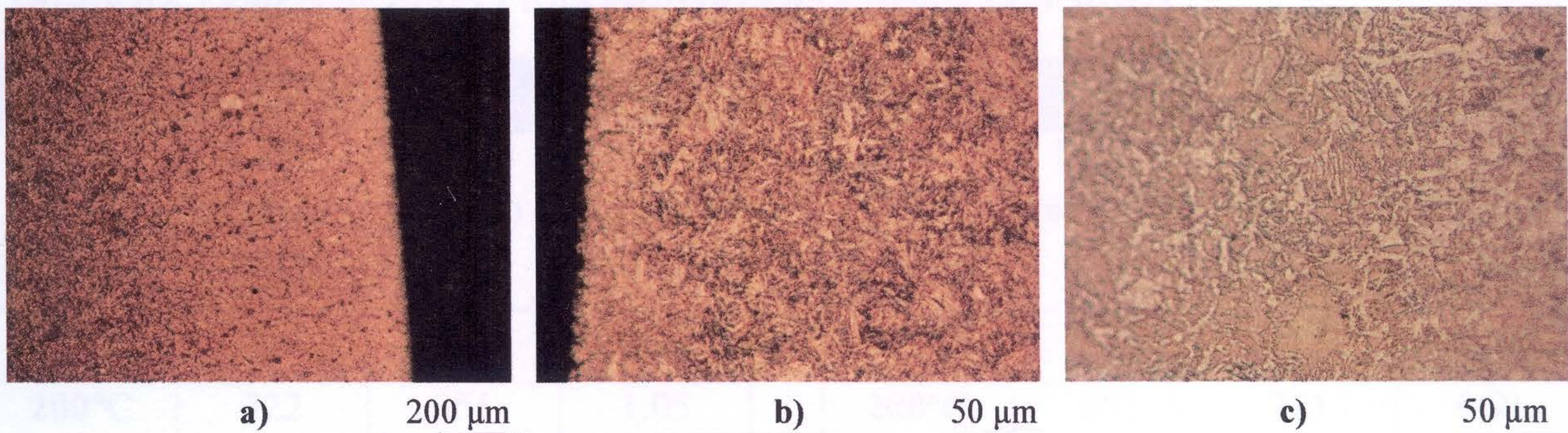


Figura 17: Microestrutura do aço G15, 78 mm de diâmetro, cementado e temperado: a) Camada superficial; b) Camada superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite

5.2. Amostras com diferentes temperaturas de revenido

Aço RMC16 (Diâmetro 24 mm)

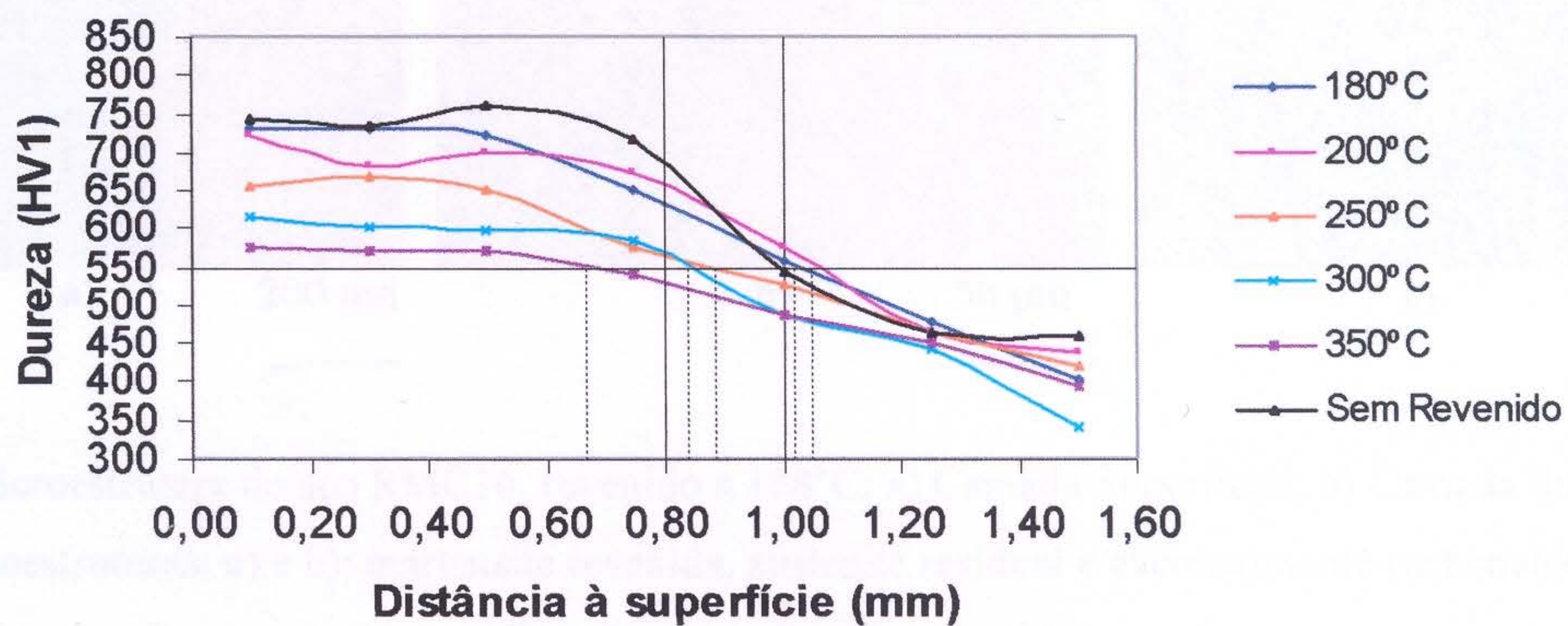


Gráfico 3 - Perfis de dureza para o aço RMC16, para amostras com diferentes temperaturas de revenido.

Aço G15
(Diâmetro 24 mm)

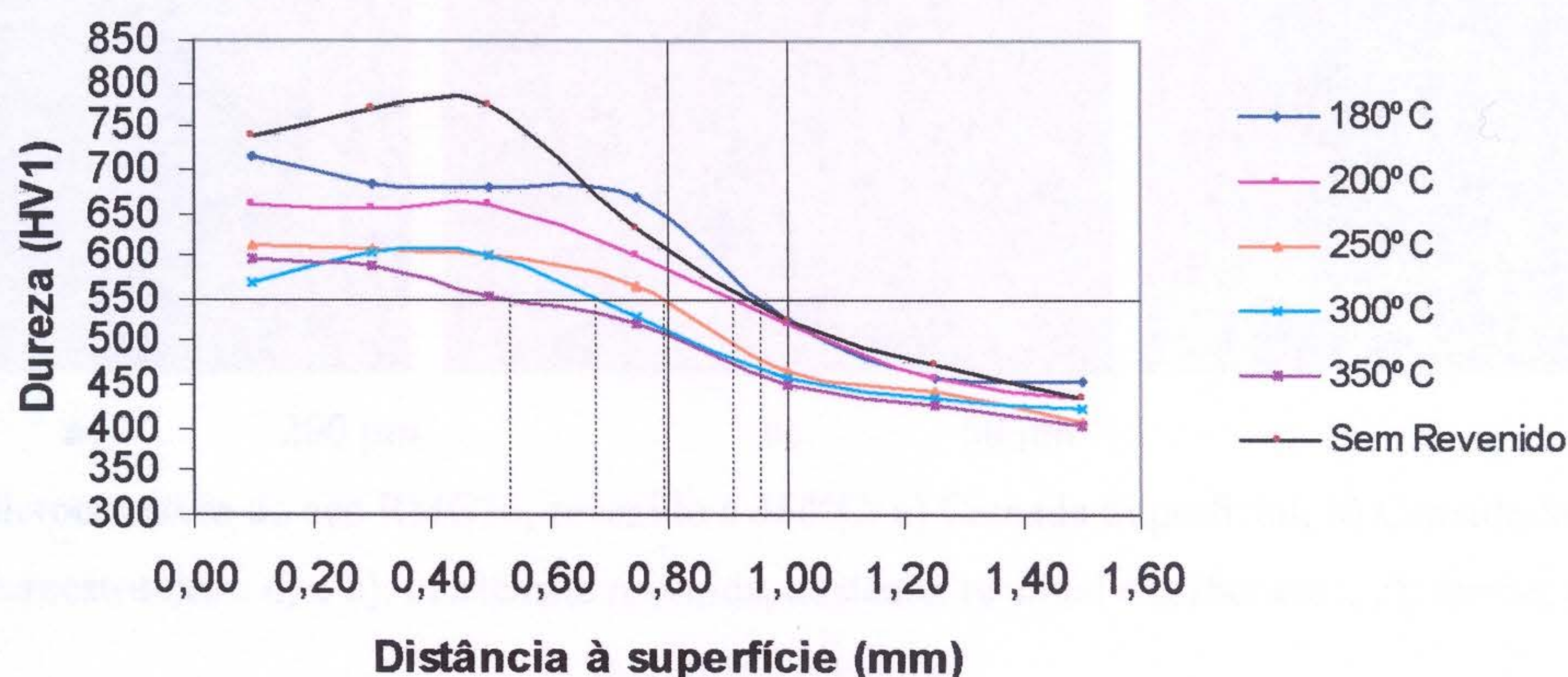


Gráfico 4 - Perfis de dureza para o aço G15, para amostras com diferentes temperaturas de revenido.

Tabela 6 - Valores de dureza e da espessura da camada cementada

Aço RMC 16			
Temp.de Revenido	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Dureza (núcleo) (HV1)	Espessura camada (mm)
180°C	730	331	1,02
200°C	722	351	1,05
250°C	656	339	0,89
300°C	615	334	0,84
350°C	575	346	0,67

Aço G15			
Temp.de Revenido	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Dureza (núcleo) (HV1)	Espessura camada (mm)
180°C	715	370	0,96
200°C	662	381	0,91
250°C	614	370	0,79
300°C	569	346	0,68
350°C	598	359	0,53

► **AÇO RMC 16**

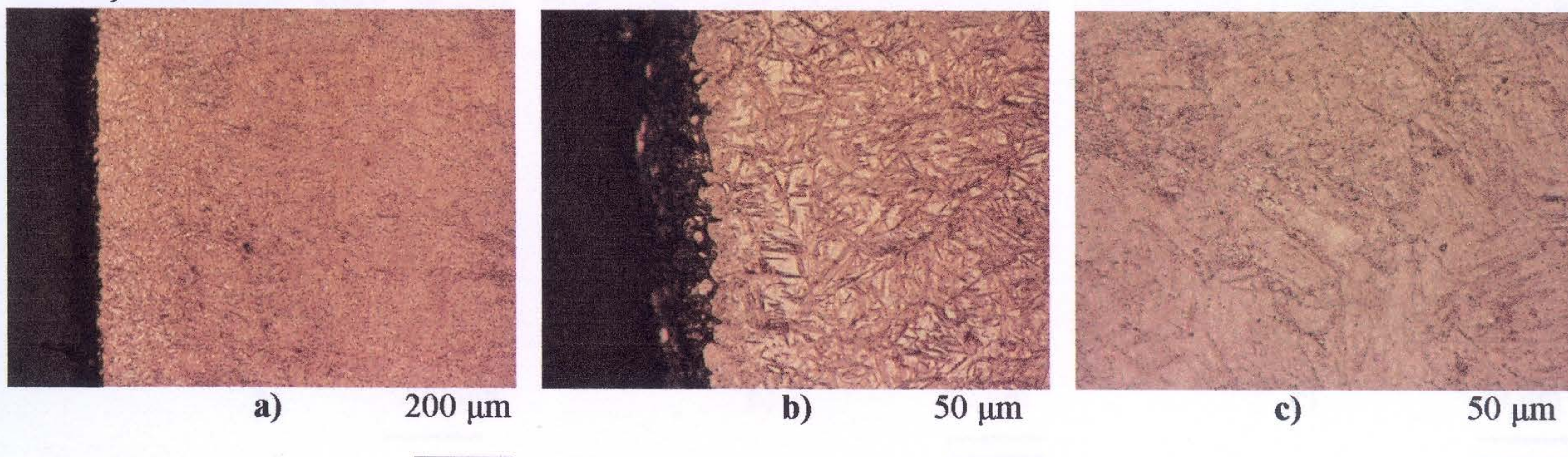


Figura 17: Microestrutura do aço RMC16, revenido a 180°C: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite revenida, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e martensite revenida.

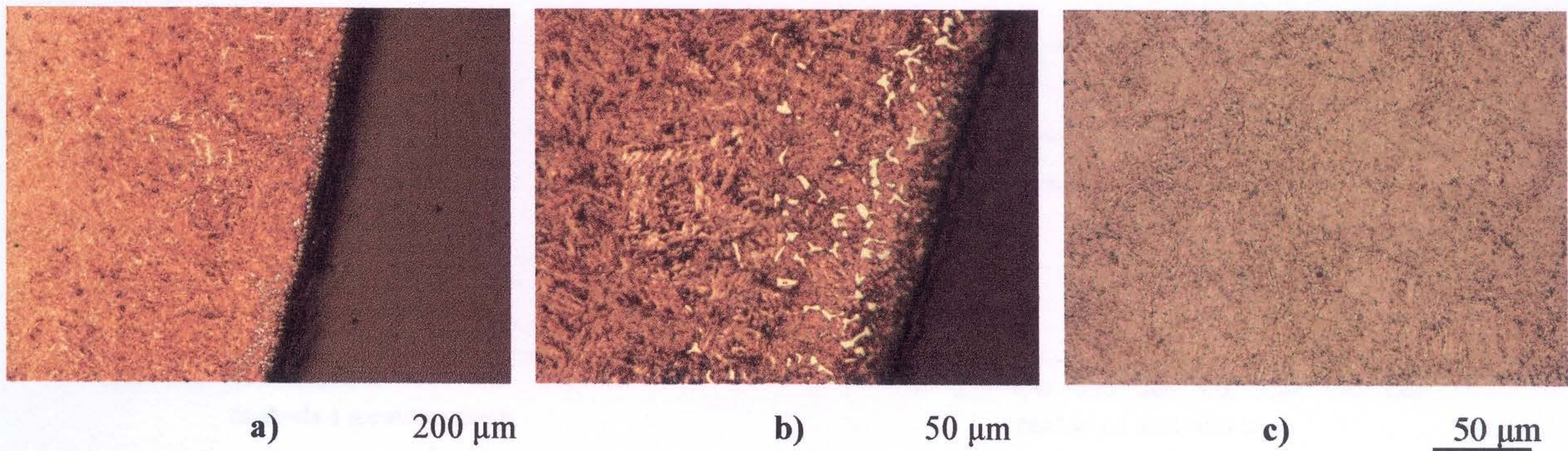


Figura 18: Microestrutura do aço RMC16, revenido a 350°C: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite revenida, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos martensite revenida.

► AÇO G15

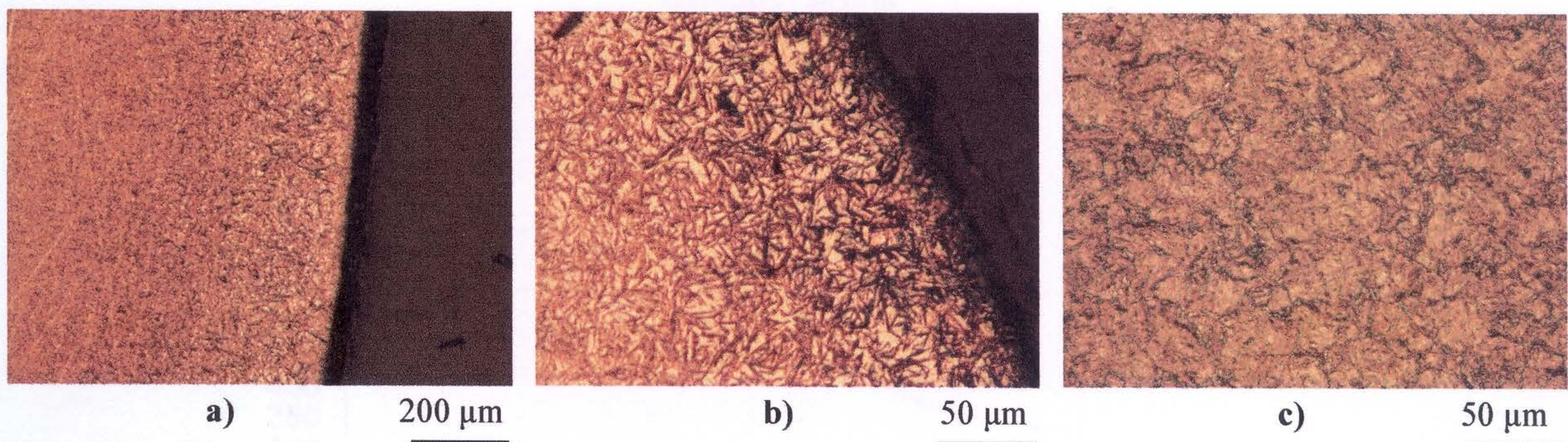


Figura 19: Microestrutura do aço G15, revenido a 180°C: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite revenida, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e martensite revenida.

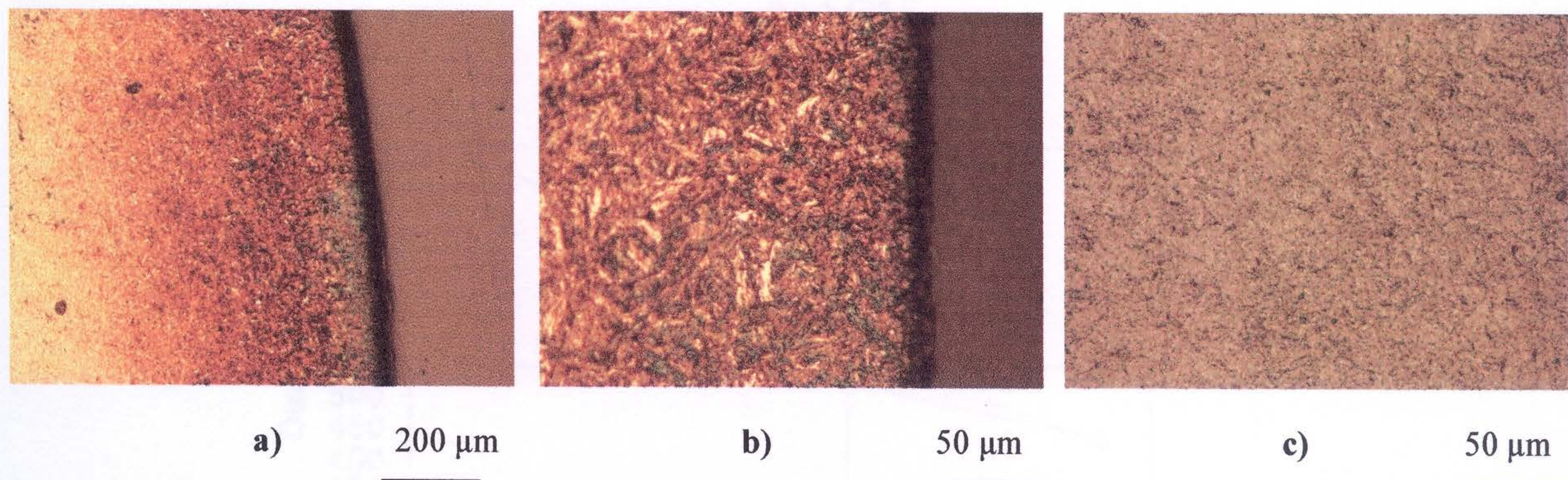


Figura 20: Microestrutura do aço G15, revenido a 350°C: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite revenida, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e martensite revenida.

5.3. Comparação entre os dois aços, utilizando os dois fornos

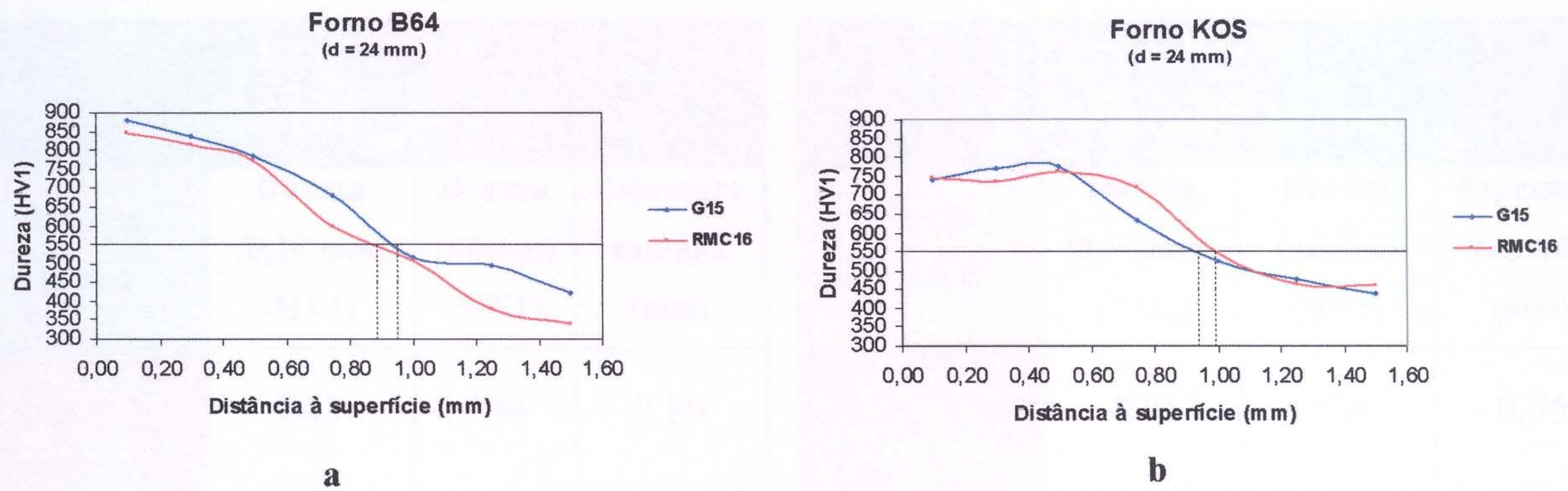


Gráfico 5 – a) Cementação a baixa pressão; b) Cementação em atmosfera controlada

5.4. Comparação entre os dois fornos, utilizando amostras de 24 mm de diâmetro

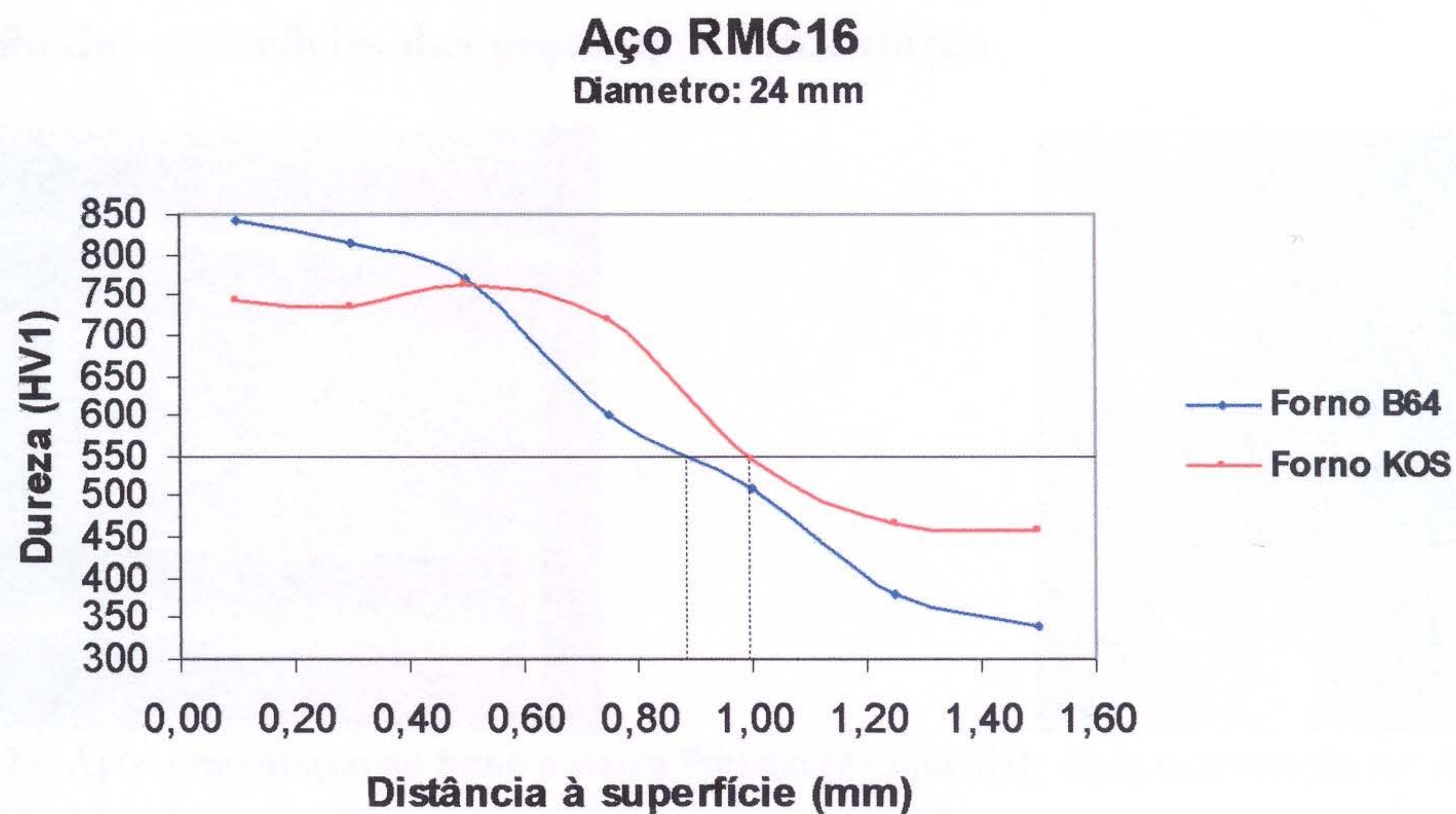


Gráfico 6 – Perfis de dureza para o aço RMC16, cementado em dois diferentes fornos

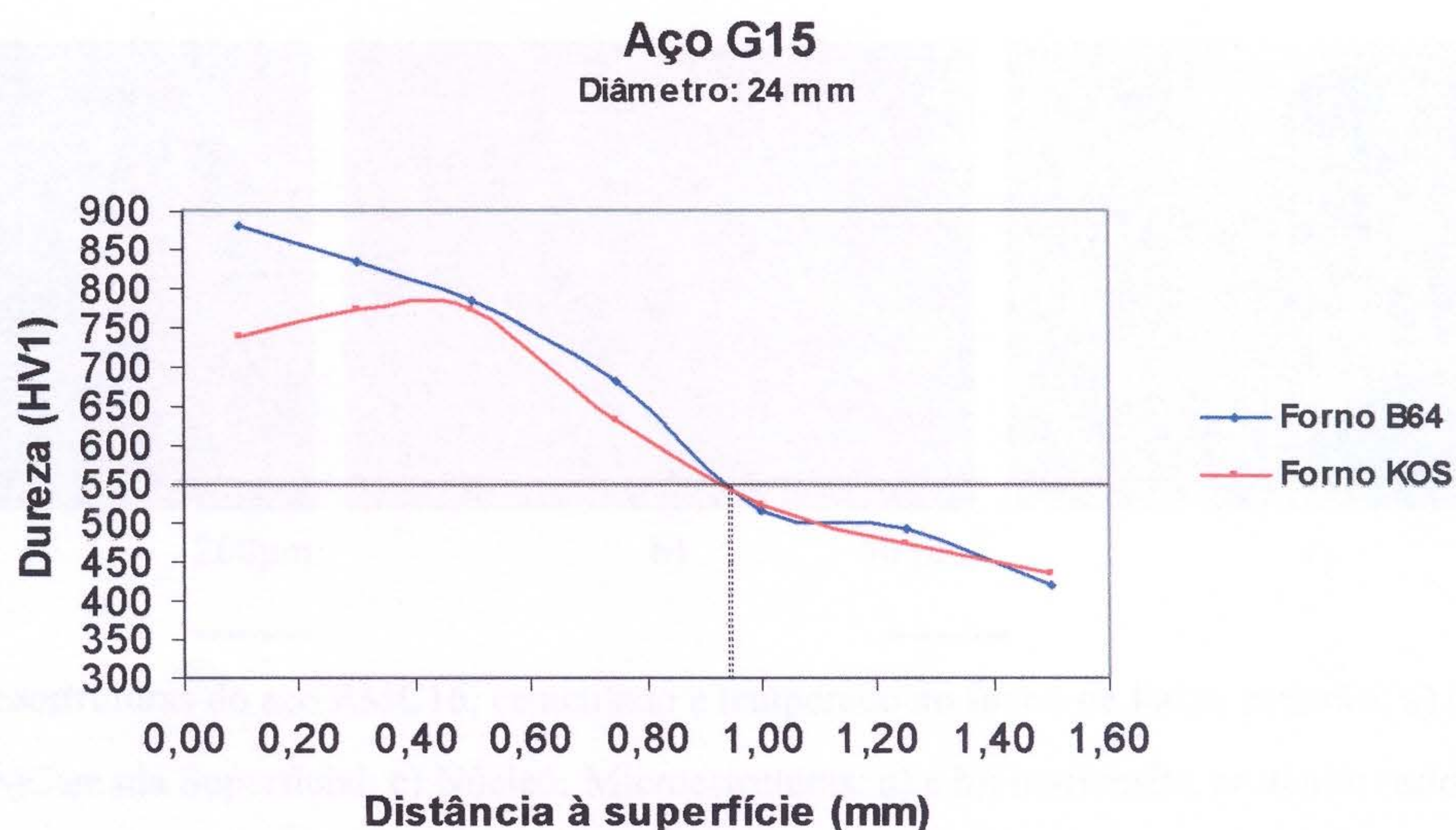


Gráfico 7 – Perfis de dureza para o aço G15, cementado em dois diferentes fornos

Tabela 7 – Valores de dureza e da espessura da camada cementada

Aço RMC 16 (Diâmetro = 24 mm)				Aço G15 (Diâmetro = 24 mm)			
Tipo de Forno	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Dureza (núcleo) (HV1)	Espessura camada (mm)	Tipo de Forno	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Dureza (núcleo) (HV1)	Espessura camada (mm)
Baixa Pressão	843	294	0,89	Baixa Pressão	879	374	0,95
Atmosfera Controlada	743	328	0,99	Atmosfera Controlada	740	359	0,94

Comparação das superfícies das peças após cementação

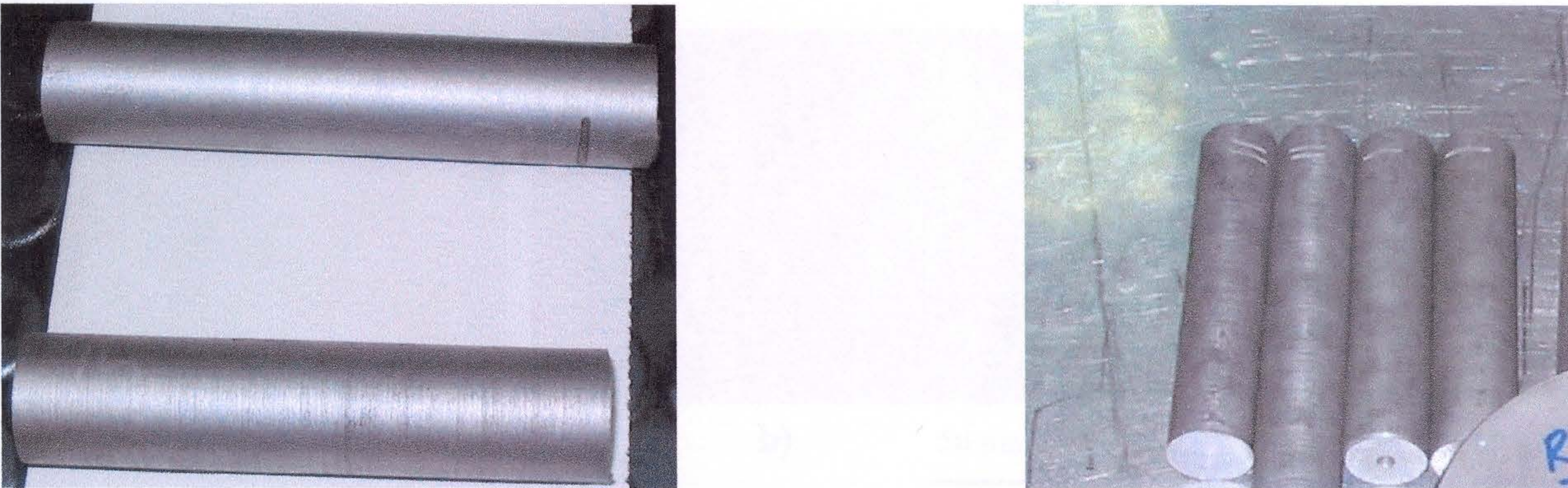


Figura 22 – Após cementação no forno a Baixa Pressão (à esquerda); Após cementação em Atmosfera Controlada (à direita)

AÇO RMC16

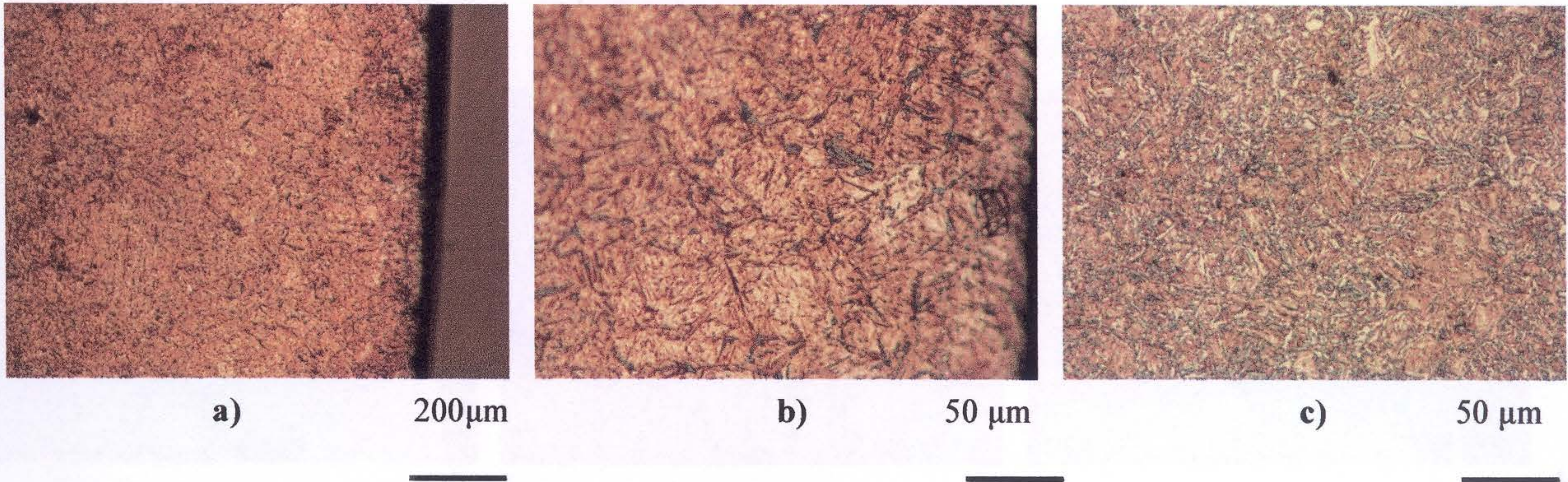


Figura 21: Microestruturas do aço RMC16, cementado e temperado no forno de baixa pressão: a) Camada Superficial; b)Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite.

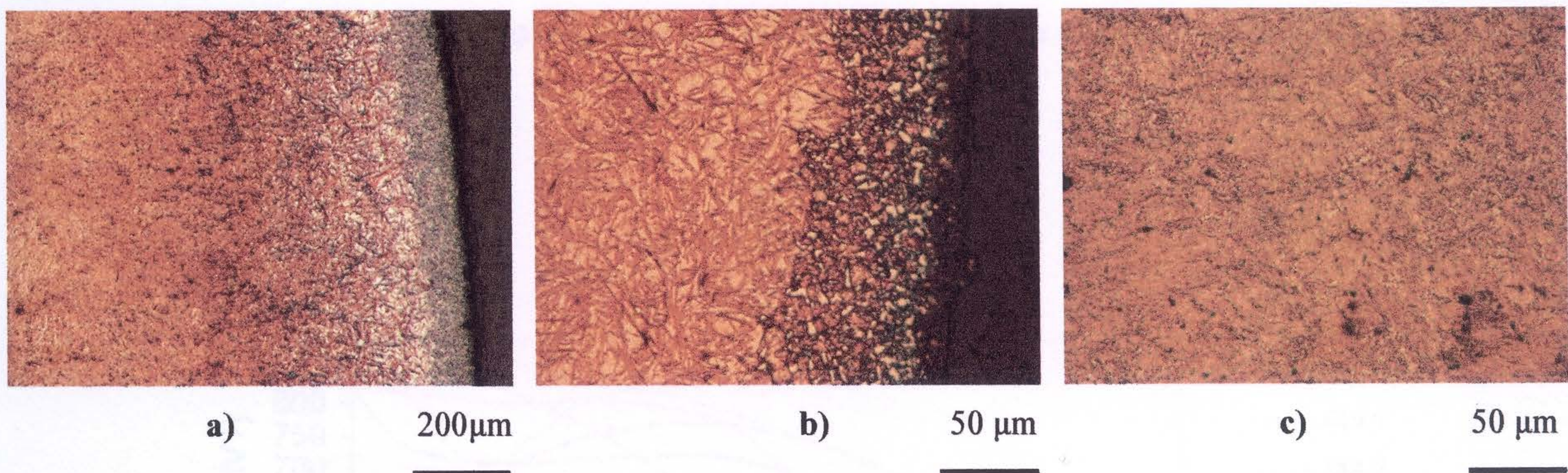


Figura 22: Microestruturas do aço RMC16, cementado e temperado no **forno de atmosfera controlada**: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite.

AÇO G15

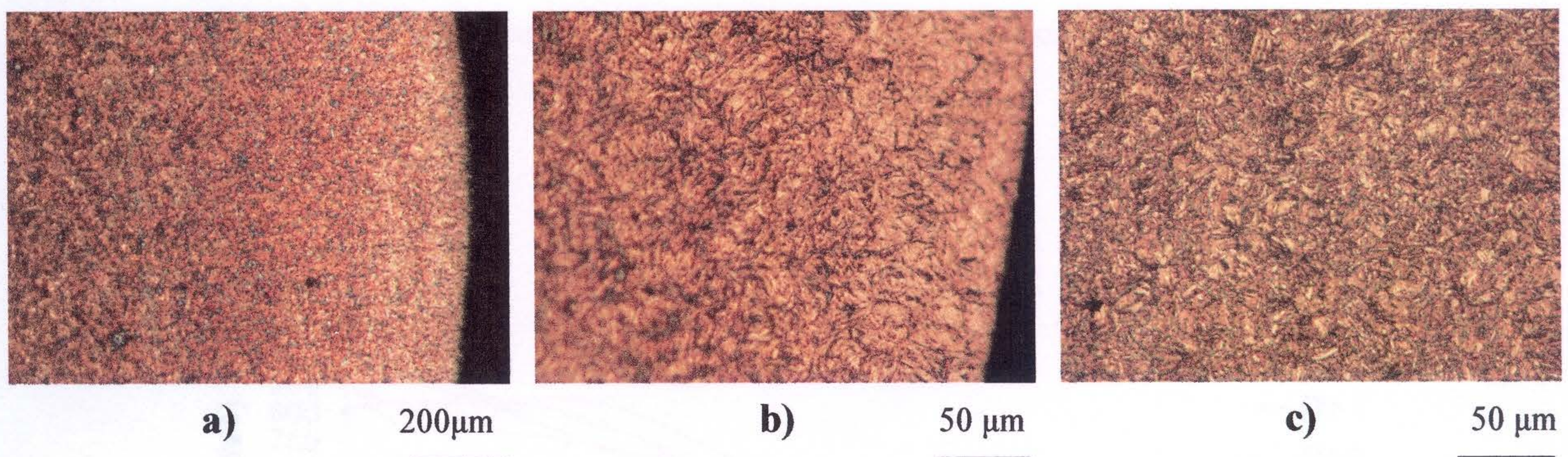


Figura 23: Microestruturas do aço G15, cementado e temperado no **forno de baixa pressão**: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo

Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite

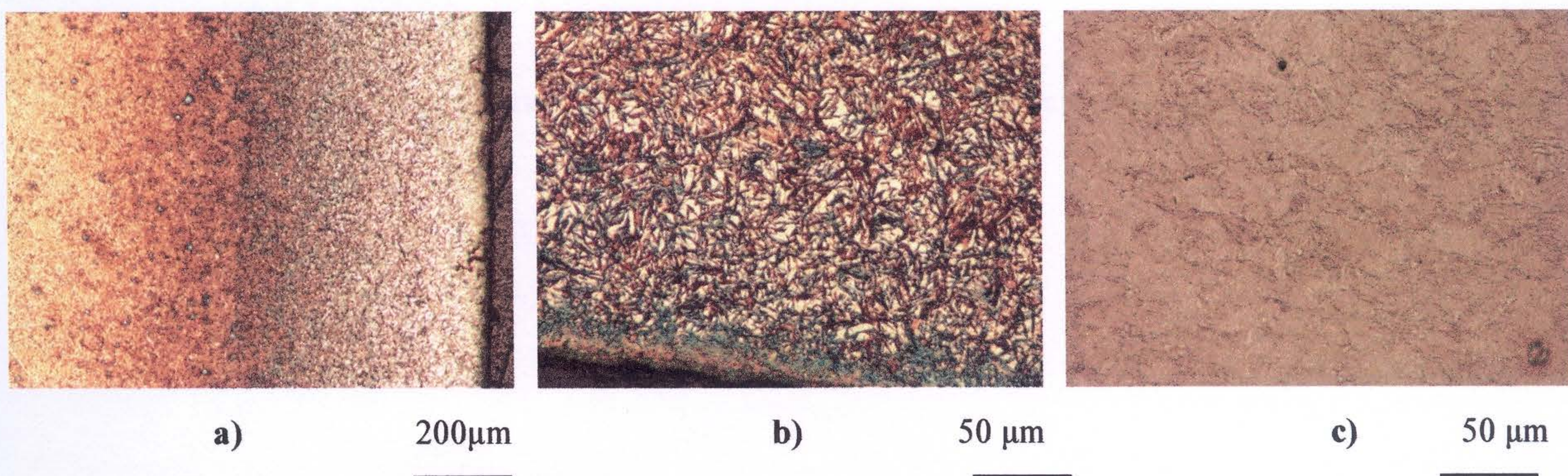


Figura 24: Microestruturas do aço G15, cementado e temperado no **forno de atmosfera controlada**: a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite

5.5. Caracterização do comportamento dos fornos ao longo de um determinado período de tempo

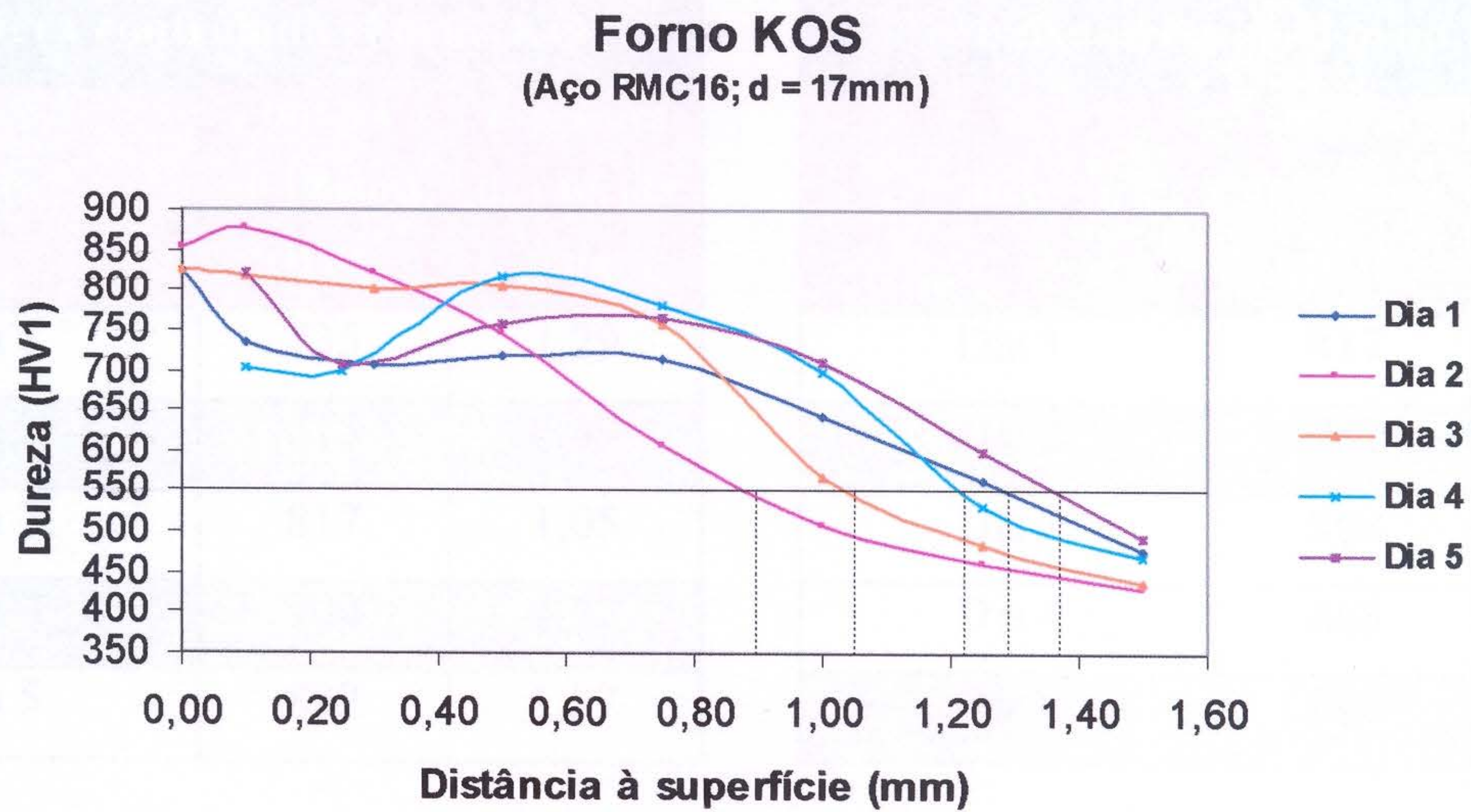


Gráfico 8 - Perfis de dureza, para o aço RMC16, após cementação em atmosfera controlada, realizada em cinco dias diferentes

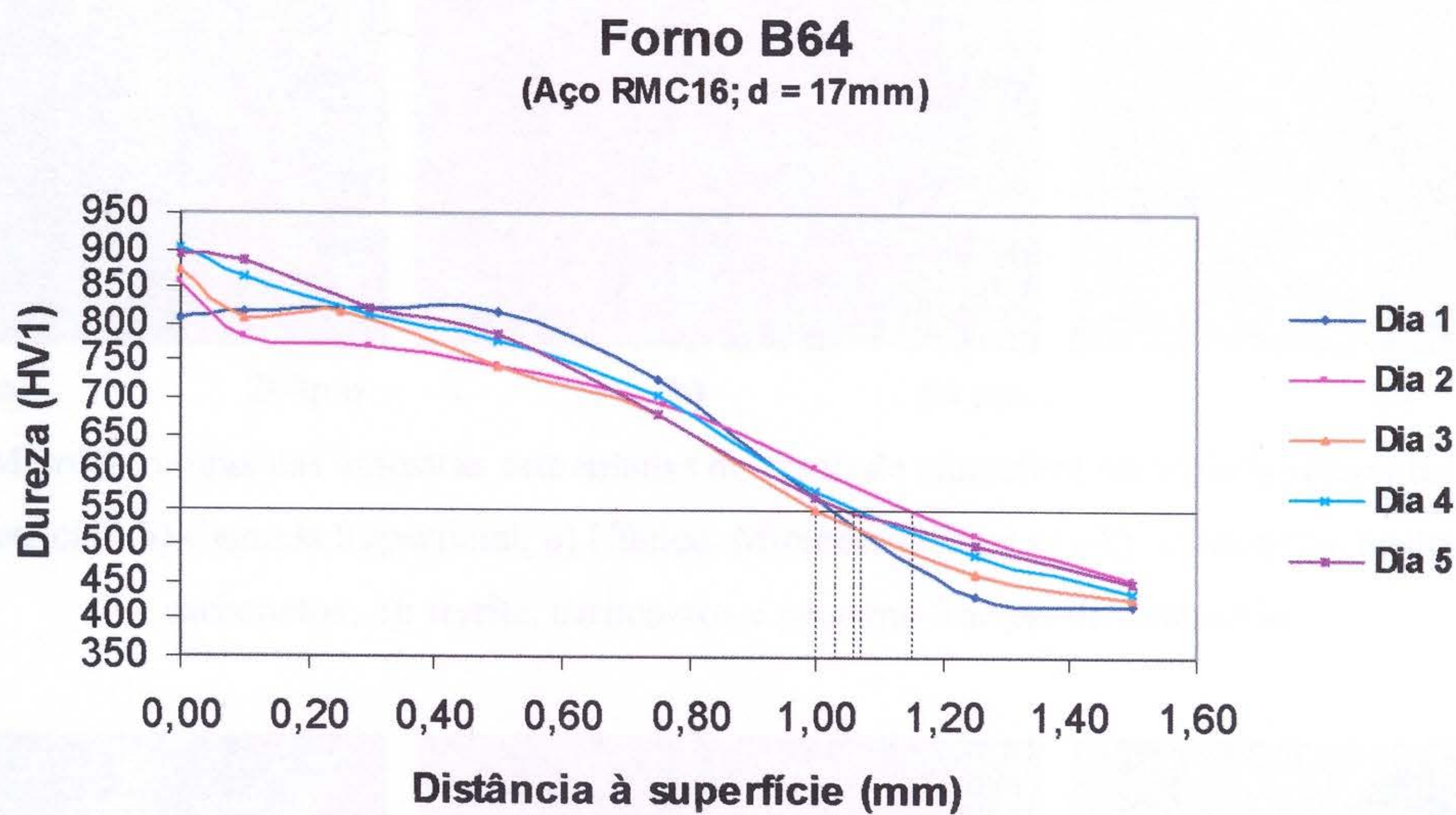


Gráfico 9 - Perfis de dureza, para o aço RMC16, após cementação a baixa pressão, realizada em cinco dias diferentes

Tabela 8 - Valores de dureza e da espessura da camada cementada

Cementação realizada no forno de atmosfera controlada - Forno KOS			Cementação realizada no forno de baixa pressão - Forno B64		
Dias	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Espessura da camada (mm)	Dias	Dureza (0,10 mm) (HV1)	Espessura da camada (mm)
Dia 1	735	1,29	Dia 1	817	1,03
Dia 2	875	0,89	Dia 2	780	1,15
Dia 3	817	1,05	Dia 3	808	1,00
Dia 4	704	1,22	Dia 4	863	1,07
Dia 5	822	1,37	Dia 5	886	1,06

◆ Forno de Atmosfera Controlada

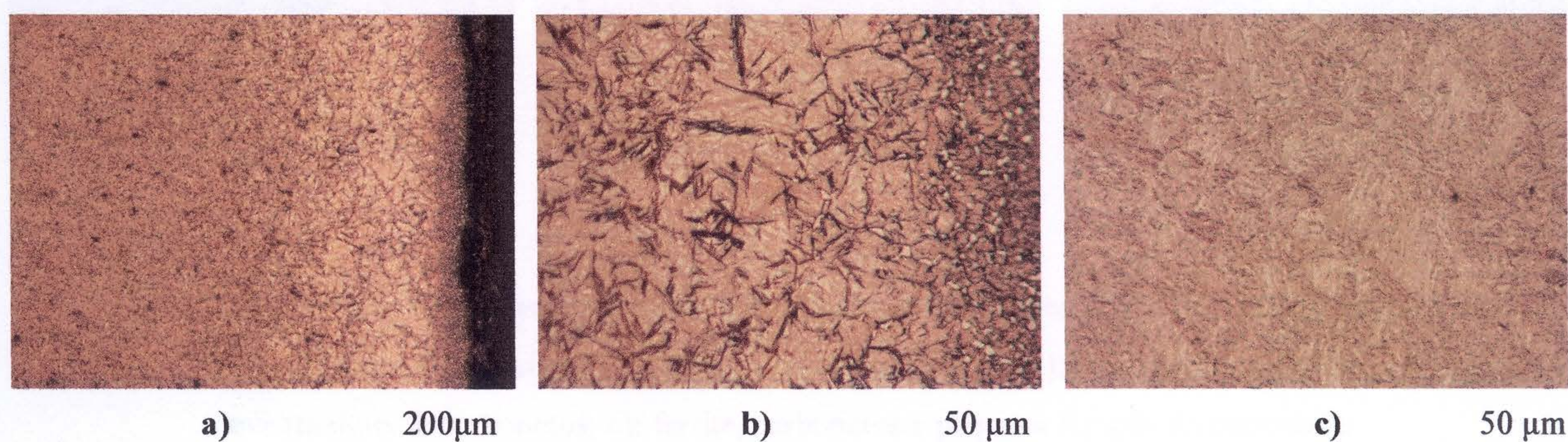


Figura 25: Microestruturas das amostras cementadas no forno de atmosfera controlada referentes ao **dia 2**; a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite

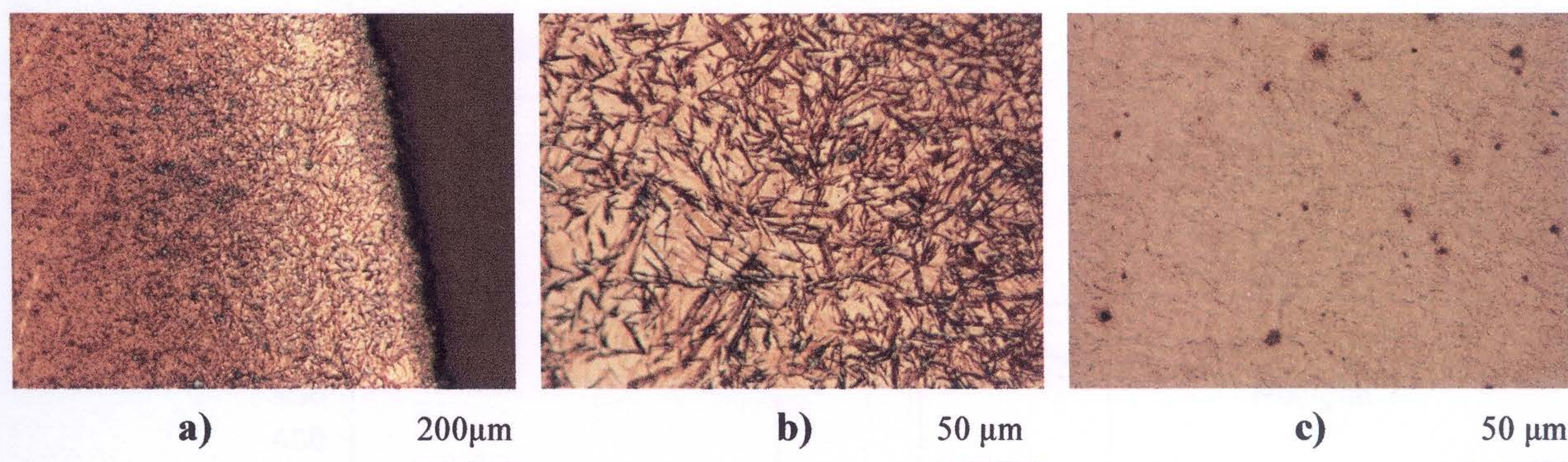


Figura 26: Microestruturas das amostras cementadas no forno de atmosfera controlada referentes ao **dia 4**; a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite.

◆ Forno de Baixa Pressão

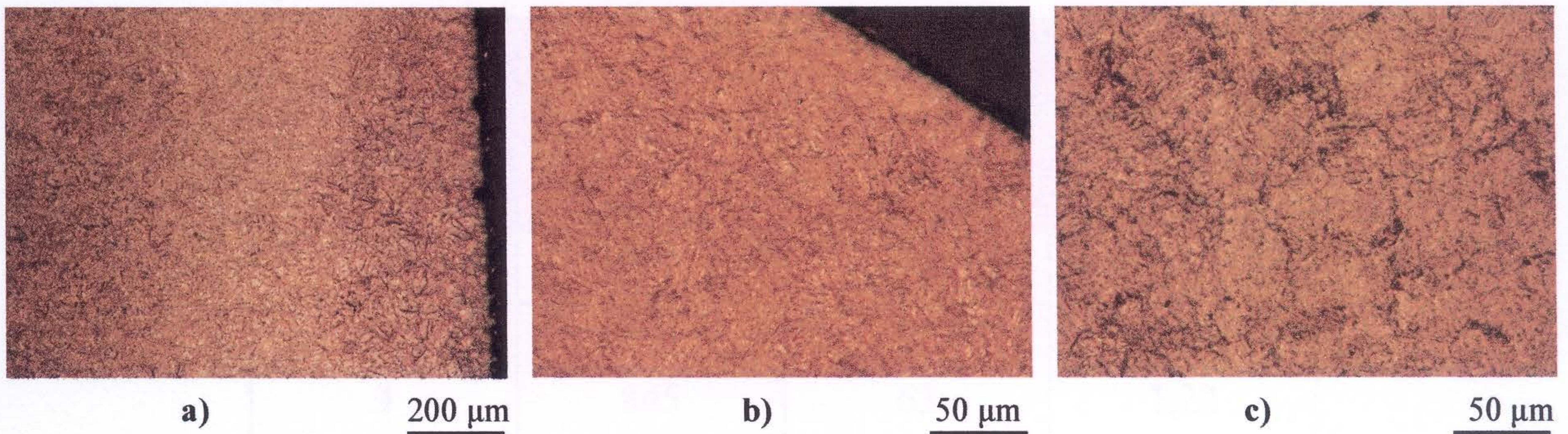


Figura 27: Microestruturas das amostras cementadas no forno de baixa pressão referentes ao **dia 2**; a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite.

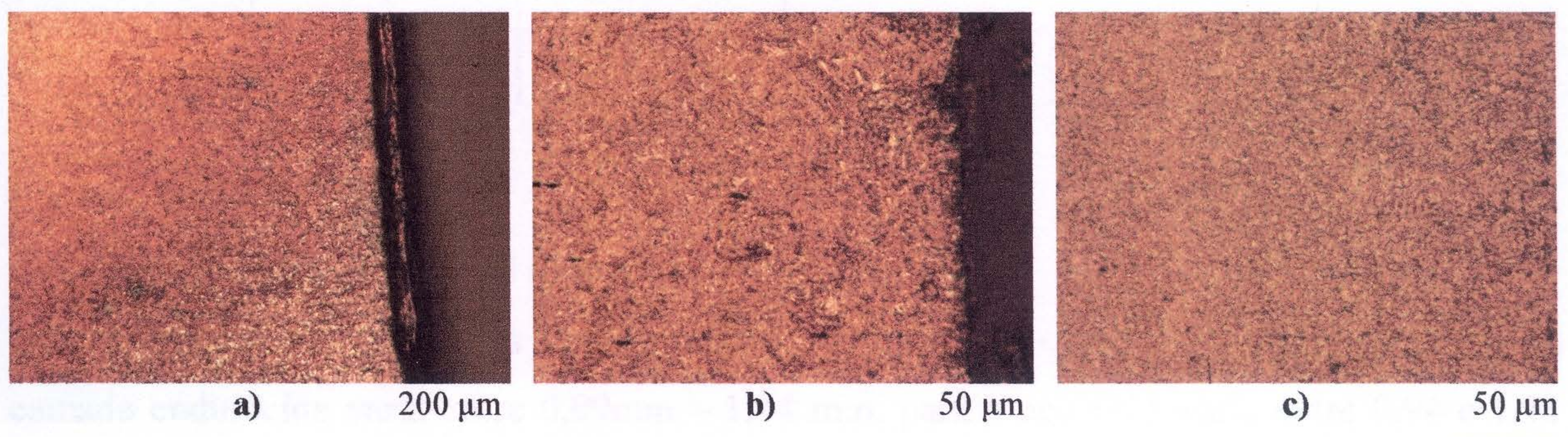


Figura 28: Microestruturas das amostras cementadas no forno de baixa pressão referentes ao **dia 5**; a) Camada Superficial; b) Camada Superficial; c) Núcleo. Microestruturas: a) e b): martensite, austenite residual e eventualmente carbonetos; c): ferrite, carbonetos e pequena fracção de martensite

5.6. Caracterização de peças colocadas em diferentes posições de uma carga.

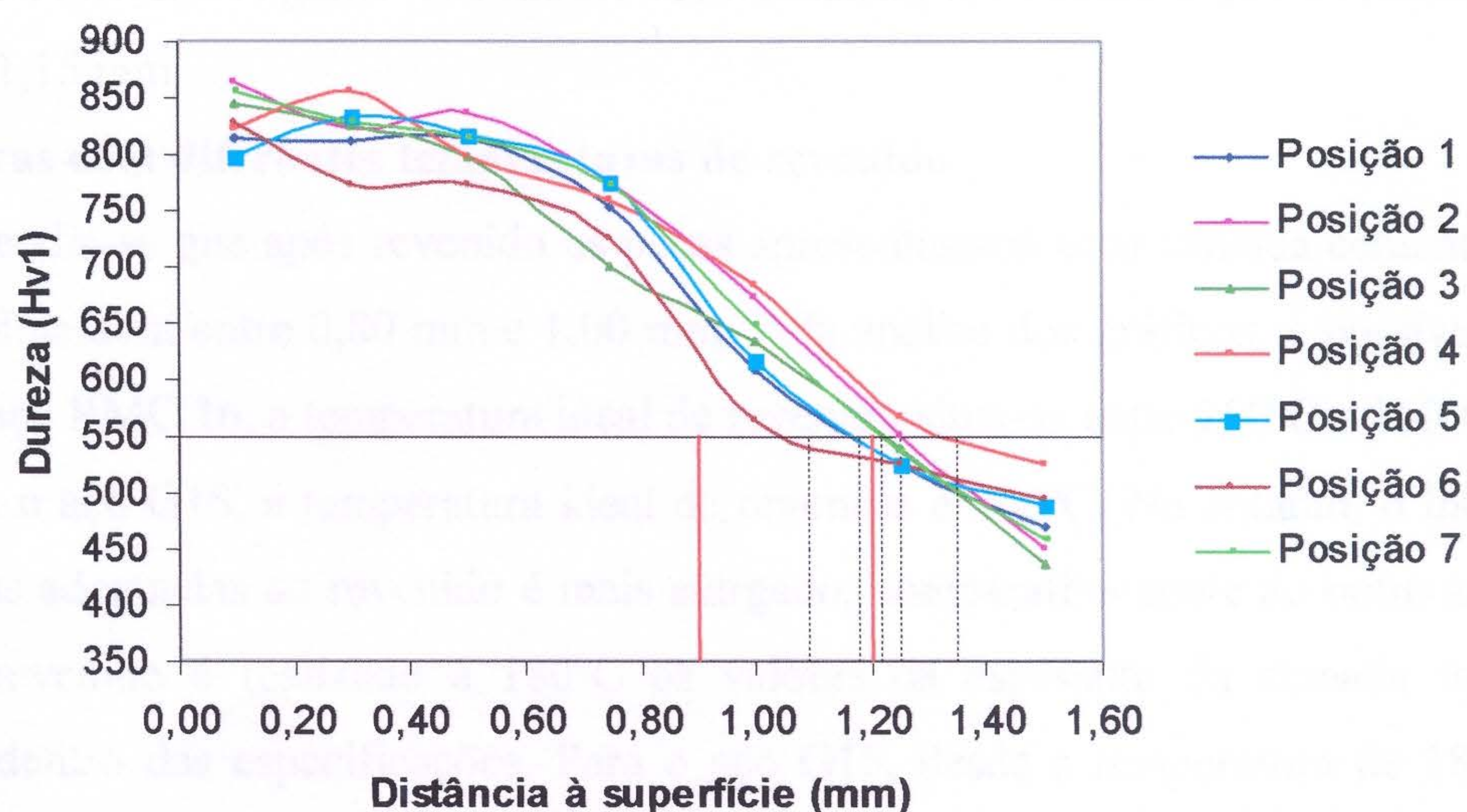


Gráfico 10 - Perfis de dureza, realizada em peças (Bielas), colocadas em diferentes posições numa carga de cementação.

Tabela 9 - Valores da distribuição da dureza

Posição das Bolas	Dureza ((0,10 mm)) ((HV1))	Dureza Superficial ((HRC))	Espessura da Camada ((mm))
1	815	64	1,18
2	863	63	1,25
3	845	63	1,22
4	821	61	1,35
5	797	65	1,18
6	828	61	1,09
7	855	63	1,22

6. Conclusão

6.1. Amostras com diferentes diâmetros

Através dos resultados obtidos verifica-se que para o aço RMC16 a espessura da camada endurecida varia entre 0,99mm – 1,14 mm, para o aço G15 varia entre 0,94 e 1,11 mm.

Os valores da espessura da camada e da dureza superficial, a 0,10 mm, não dependem da espessura das peças.

Em relação à dureza no núcleo, estes valores aumentam inversamente ao diâmetro das peças, para os dois tipos de aços, ou seja, quanto menor for a espessura da peça maior será a dureza no seu interior. A gama de controlo recomendada, após cementação e têmpera directa, será 0,90 – 1,15 mm.

6.2. Amostras com diferentes temperaturas de revenido

Pretendia-se que após revenido as peças apresentassem uma camada cementada cujos valores se situassem entre 0,80 mm e 1,00 mm. Pela análise dos gráficos, é possível concluir que para o aço RMC 16, a temperatura ideal de revenido situa-se entre 250°C e 350°C.

Para o aço G15, a temperatura ideal de revenido é 200°C. No entanto, o intervalo de temperaturas adequadas ao revenido é mais alargado, comparativamente ao outro aço, isto é, quando o revenido é realizado a 180°C os valores da espessura da camada também se encontram dentro das especificações. Para o aço G15, desde a temperatura de 180°C até à temperatura de 250°C, a espessura da camada encontra-se dentro valores especificados. Apenas para temperaturas superiores a 250°C, é que os valores da espessura da camada

cementada, são muito reduzidos, encontrando-se fora do intervalo pretendido. Todos os revenidos tiveram o mesmo tempo de estágio: 1 hora.

Quanto mais elevada for a temperatura de revenido, menor será a dureza superficial (medida a 0,10 mm da superfície) e menor será a espessura da camada cementada.

As diferenças registadas nos valores da dureza do núcleo não são significativas:

	HV1 – 0,10mm da superfície		HV1 – Núcleo	
	180°C	350°C	180°C	350°C
Aço RMC16	730	575	331	346
	Diferença de 155 HV		Diferença de 15 HV	
Aço G15	715	598	370	359
	Diferença de 117 HV		Diferença de 11HV	

6.3. Comparação entre os fornos, utilizando em cada um deles o mesmo tipo de aço

Os valores da dureza superficial são mais elevados quando o tratamento é efectuado no forno de baixa pressão apresentando diferenças superiores a 100HV1, sendo os valores da espessura da camada praticamente idênticos. As diferenças da dureza no núcleo não são consideradas significativas. No forno de baixa pressão as superfícies ficam com aspecto mais brilhante comparativamente ao forno de atmosfera controlada.

6.4. Comportamento dos fornos ao longo dos dias:

Através da análise dos gráficos e dos valores obtidos, é possível concluir que a cementação realizada no forno de baixa pressão apresenta valores mais homogêneos quando comparada ao forno de atmosfera controlada. Para o forno de atmosfera controlada, a diferença entre os valores mínimos e máximos da dureza a 0,10 mm da superfície é de 171 HV1, enquanto que para o de baixa pressão é de 106 HV1.

Em relação à espessura da camada endurecida, quando o tratamento é realizado no forno de atmosfera controlada, os valores vão desde 0,89 mm a 1,37 mm, ou seja uma diferença de 0,48 mm. No caso do forno de baixa pressão, estes mesmos valores vão desde 1,00 mm a 1,15 mm, ou seja, uma diferença de 0,15 mm.

6.5. Caracterização de uma carga

Pretendia-se que após tratamento todas as peças apresentassem valores de espessura da camada cementada situados entre 0.90 mm a 1.20 mm após a rectificação final. Pela análise dos valores obtidos, é possível concluir que a espessura das camadas variam entre 1,09 mm a 1,35 mm. No entanto, estes valores foram obtidos antes das peças serem rectificadas. Após rectificação, a espessura das camadas encontra-se dentro dos limites especificados.

Os valores da dureza medidos a 0,10 mm da superfície variam desde 797 HV1 a 863 HV1, ou seja uma diferença de 66 HV1 entre os valores de dureza máximo e mínimo, este valor não é considerado significativo.

7. Bibliografia:

- [1] - [www. Riffle.com.br](http://www.Riffle.com.br)
- [2] - Sebenta de tratamentos térmicos – Henrique MCM Santos – FEUP 1996
- [3] - Aços, características e tratamentos, Pinto Soares, 5ª Edição, 1992.
- [4] - Metals Handbook. Ninth edition, Volume 4 – Heat Treating, American Society of Metals
- [5] - Tratamento Térmico dos Aços, Eng. José Diogo Costa, INII, Lisboa, 1968
- [6] - [www. brasimet.com](http://www.brasimet.com).
- [7] - Steel and its heat treatment, K. Thelning, 1975, The Butterworth Group
- [8] - Metallography and Microstructures, volume 9, ASM Handbook, The Materials Information Society.

Anexos

A – Fichas técnicas dos aços G15 e RMC 16 – proporcionar uma melhoria documental

B – Ultra-sons, tendo como objectivo a implementação de novos documentos de controlo de qualidade aos produtos maquinados.

C – Caracterização dos níveis de inclusões existentes em cinco diferentes tipos de aços utilizados na indústria dos moldes – análise de fornecedores

ANEXO A



Designação: Aço de Cementação

Marca: G 15 Special

Cor: Cinza

Estado de fornecimento: Recozido

Qualidade e Normas Equivalentes:

Num. do Material	EURONORM EN	AISI	SS	AFNOR	DIN
1.5752	15 NiCr 13	3415	2514	12 NC 15	14 NiCr 14
1.6587	18 CrNiMo 7-6			18 NCD 6	17 CrNiMo 6

Dimensões superiores ao Ø 220: Qualidade 1.6587

Dimensões inferiores ao Ø 220: Qualidade 1.5752

Aplicações Principais:

1.5752: Veios, engrenagens, rodas dentadas, juntas de cardan para solicitações standard, etc.

1.6587: Rodas dentadas de elevada resistência, rótulas de direcção, etc

Exemplos de aplicações:

Composição Química:

Qualidade	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Outros
1.5752	0,14 — 0,20	≤ 0,40	0,40 — 0,70	0,60 — 0,90	—	3,00 — 3,50	≤ 0,035	≤ 0,035	—
1.6587	0,15 — 0,21	≤ 0,40	0,50 — 0,90	1,50 — 1,80	0,25 — 0,35	1,40 — 1,70	≤ 0,025	≤ 0,015	Al ≤ 0,05 Cu ≤ 0,30

Propriedades Mecânicas

Propriedades Mecânicas			
Num. Material	Recozido Parcialmente $\leq$ HB 30	Tratado para uma determinada gama de dureza $\varnothing \leq 150\text{mm}$ HB 30	Tratado para estrutura ferrite-perlite $\varnothing \leq 60\text{mm}$ HB 30
1.5752	229	179 - 229	166 – 217
1.6587			159 - 207

Após Cementação (Valores no Núcleo)															
Num. Material	Tensão Limite Convencional de Proporcionalidade a 0.2% (R0.2)			Tensão de Rotura (Rm)			Extensão Após Rotura (A) $L_0 = 5 d_0$			Estricção (Z)			Resistência ao Choque (DVM)		
	$\sigma_{0.2}$			R_m			A_5			Z_5			K_{IC}		
	$\varnothing$ 11mm	$\varnothing$ 30mm	$\varnothing$ 63mm	$\varnothing$ 11mm	$\varnothing$ 30mm	$\varnothing$ 63mm	$\varnothing$ 11mm	$\varnothing$ 30mm	$\varnothing$ 63mm	$\varnothing$ 11mm	$\varnothing$ 30mm	$\varnothing$ 63mm	$\varnothing$ 11mm	$\varnothing$ 30mm	
1.5752	835	785	735	1030 - 1320	930 - 1230	880 - 1180	9	10	10	40	45	45	45	55	
1.6587	835	785	685	1180 - 1420	1080 - 1320	980 - 1270	7	8	8	30	35	35	41	41	

Tratamento Térmico					
Num. Material	Trabalho a Quente $^{\circ}\text{C}$	Recozimento Parcial (+A) $^{\circ}\text{C}$	Tratado para uma determinada gama de dureza (+TH) $^{\circ}\text{C}$	Tratado para estrutura ferrite-perlite(+FP) $^{\circ}\text{C}$	Cementação $^{\circ}\text{C}$
1.5752	1150 - 850	610 – 650	830 - 860	900 – 950	880- 980
1.6587	1150 - 850	650 – 700	850 - 950	900 - 100	880 - 980

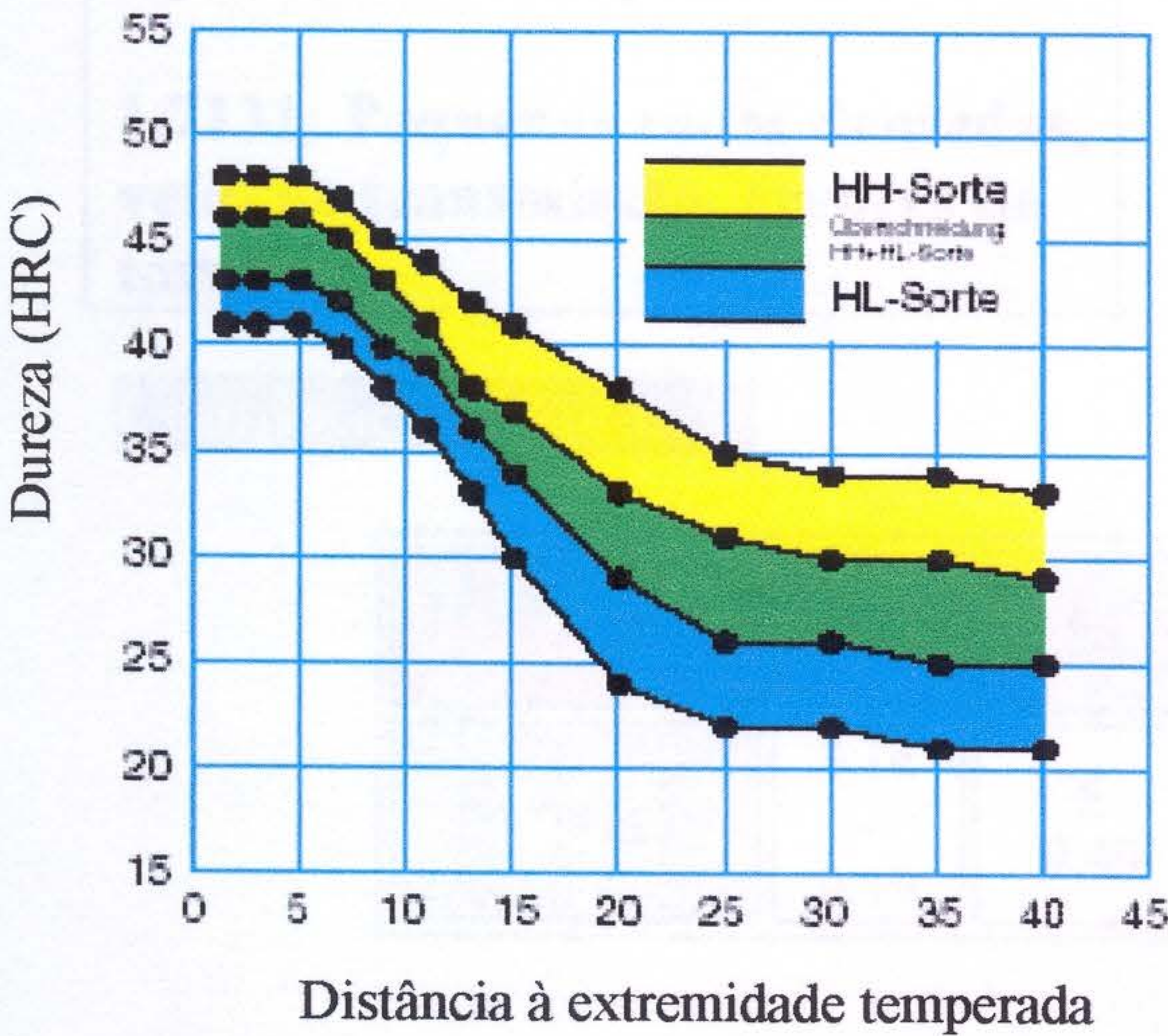
Tratamento Térmico				
Num. Material	Têmpera no Núcleo $^{\circ}\text{C}$	Recozimento Intermédio $^{\circ}\text{C}$	Têmpera Superficial $^{\circ}\text{C}$	Revenido $^{\circ}\text{C}$
1.5752	840 - 880	600 – 630	780 - 820	150 -200
1.6587	830 - 870	630 – 650	780 - 820	150 - 200

Propriedades Mecânicas:

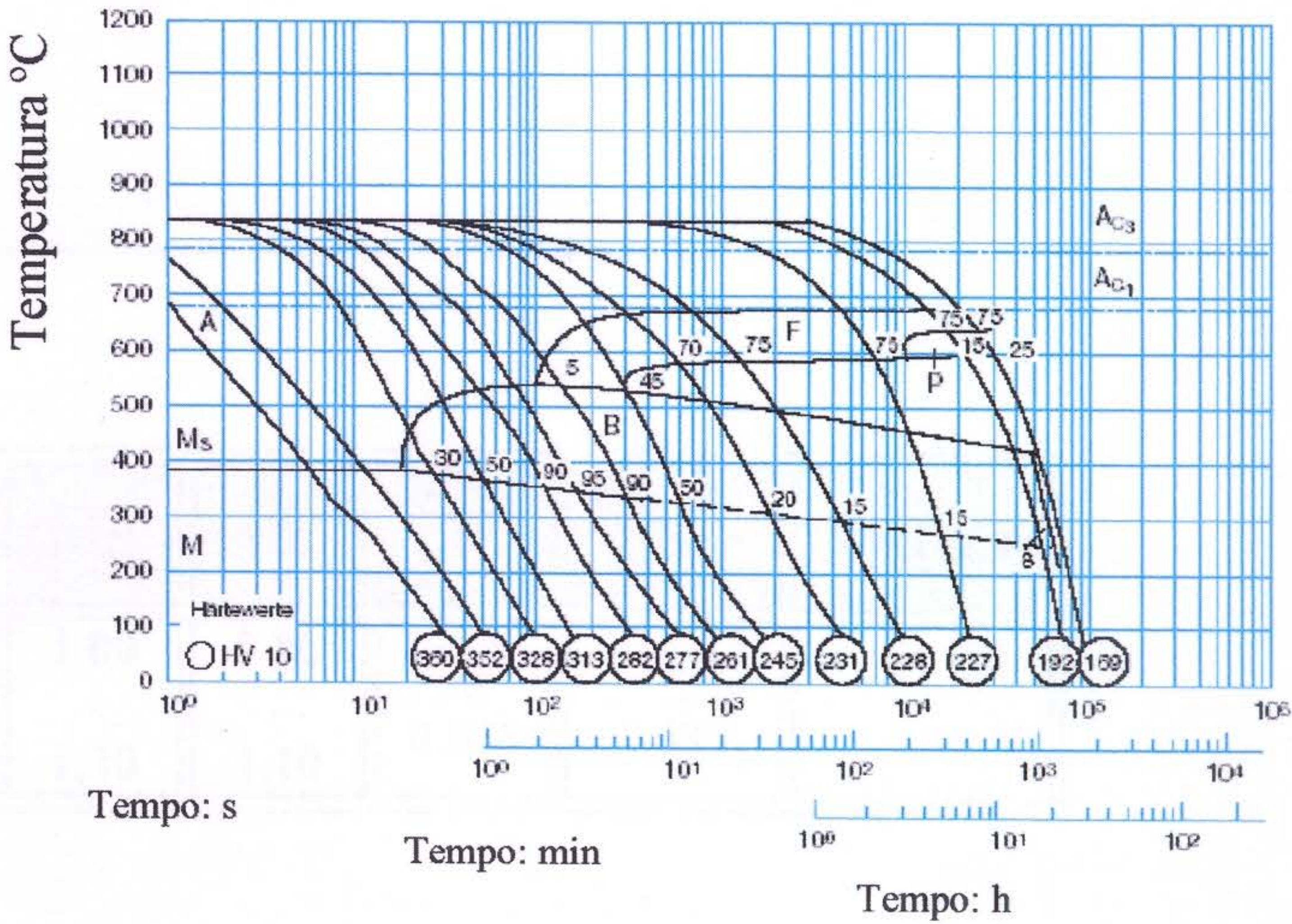
Designação		Espessura	Propriedades mecânicas			
Nome	Número		+A+torneado	+A+estirado a frio	+FP+torneado	+FP+estirado a frio
		mm	Dureza HB máx	Dureza HB máx	Dureza HB máx	Dureza HB máx
15NiCr13 (G15) ≤ 220	1.5752	≥ 5 ≤ 10	-			-
		> 10 ≤ 16	-			-
		> 16 ≤ 40	255		166 - 217	
		> 40 ≤ 63	255		166 - 217	
		> 63 ≤ 100	255		166 - 217	

+A = Recozido para o requisito de dureza máxima
+FP = Tratado por uma estrutura ferrite-perlite + gama de dureza

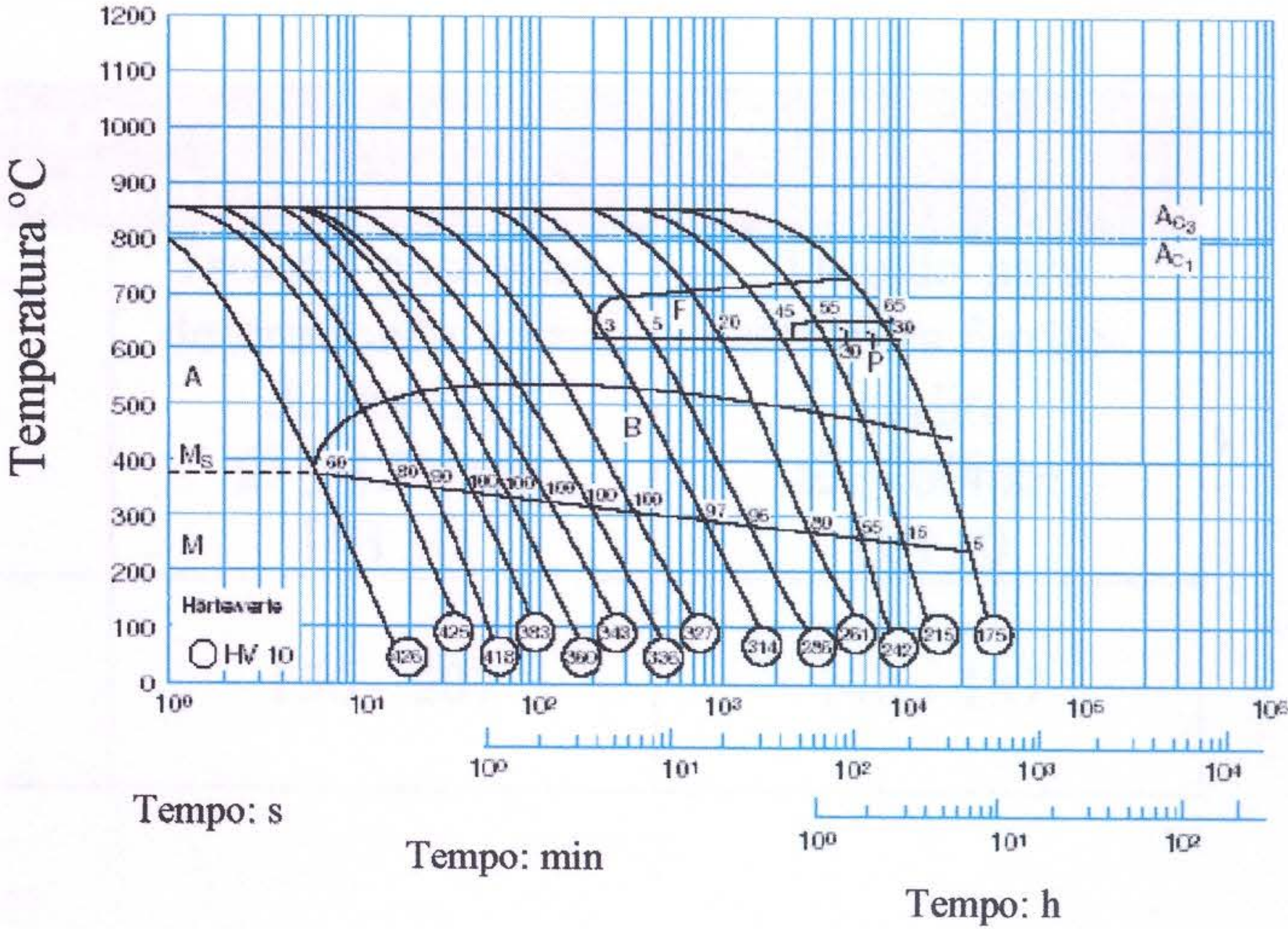
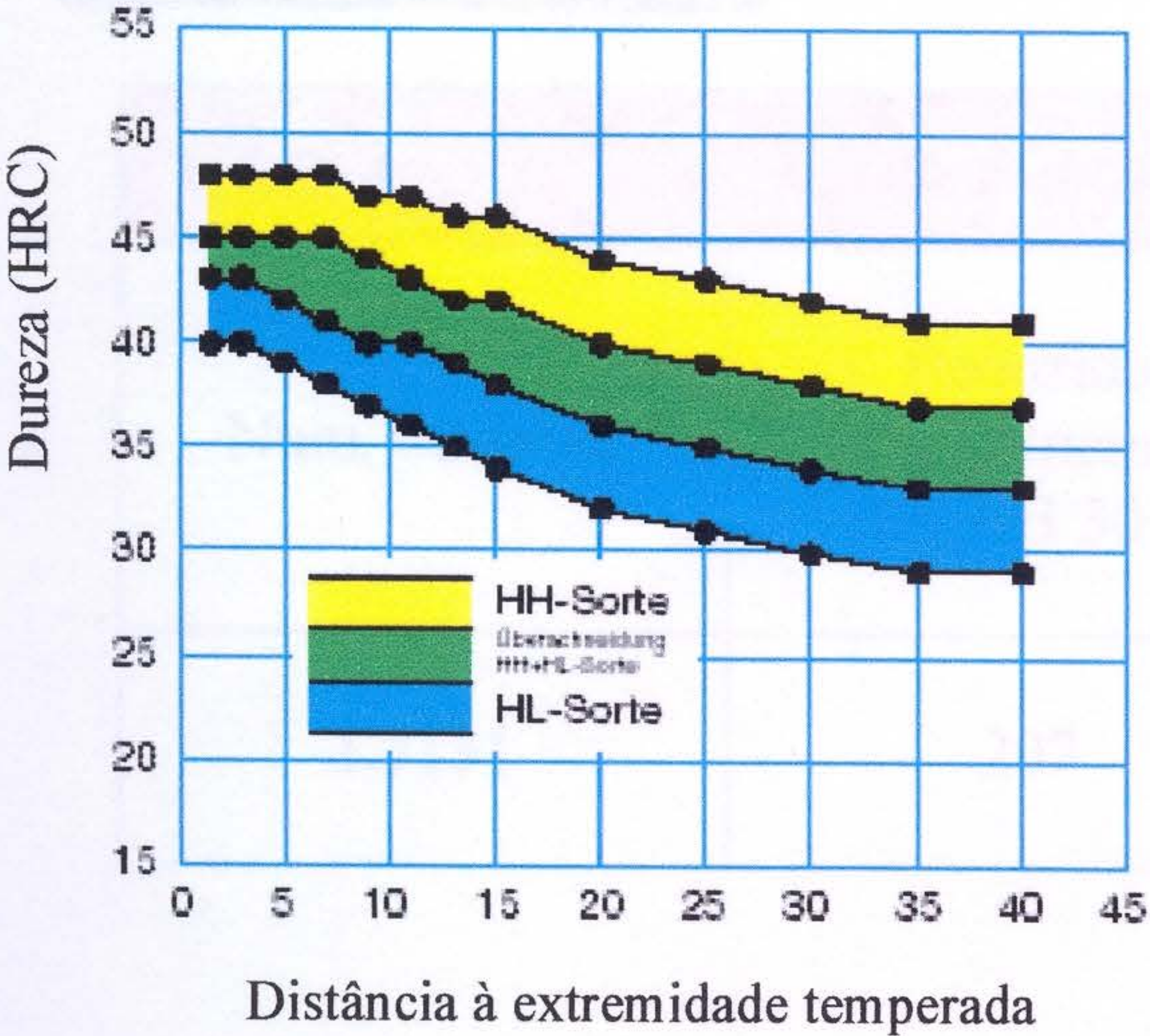
▶ Classe 1.5752:
Resultados do ensaio Jominy



Curva TAC



▶ Classe 1.6587:



Designação: Aço de Cementação

Marca: RMC 16

Cor: Cinza – – Cinza

Estado de fornecimento: Natural

Qualidade e Normas Equivalentes:

Num. do Material	EURONORM EN	AISI	SS	AFNOR	DIN
1.7131	16 Mn Cr 5	5115	2514	16 MC 5	16 MnCr 5

Aplicações Principais:

1.7131: Pequenas rodas dentadas, veios de transmissão, árvores de torno, etc.

Exemplos de aplicações:

Composição Química:

Qualidade	C	Si	Mn	Cr	P	S	Outros
1.7131	0,14 - 0,19	≤ 0,40	1,00 - 1,30	0,80 - 1,10	≤ 0,035	≤ 0,035	

Propriedades Mecânicas

Num. Material	Recozido Parcialmente ≤ HB 30	Tratado para uma determinada gama de dureza Ø ≤ 150mm HB 30	Tratado para estrutura ferrite-perlite Ø ≤ 60mm HB 30
1.7131	207	156 - 207	140 - 187

Após Cementação (Valores no Núcleo)														
Num. Material	Tensão Limite Convencional de Proporcionalidade a 0.2% (R0.2)			Tensão de Rotura (Rm)			Extensão Após Rotura (A) $L_0 = 5 d_0$			Estricção (Z)			Resistência ao Choque (DVM)	
	Ø 11mm	Ø 30mm	Ø 63mm	Ø 11mm	Ø 30mm	Ø 63mm	Ø 11mm	Ø 30mm	Ø 63mm	Ø 11mm	Ø 30mm	Ø 63mm	Ø 11mm	Ø 30mm
1.7131	635	590	440	880 - 1180	780 - 1080	640 - 930	9	10	11	35	40	40	34	34

Tratamento Térmico					
Num. Material	Trabalho a Quente °C	Recozimento Parcial (+A) °C	Tratado para uma determinada gama de dureza (+TH) °C	Tratado para estrutura ferrite- perlite(+FP) °C	Cementação °C
1.7131	1150 - 850	650 - 700	850 - 950	900 - 1000	880- 980

Tratamento Térmico			
Num. Material	Têmpera no Núcleo °C	Têmpera Superficial °C	Revenido °C
1.7131	860 - 900	780 - 820	150 -200

Propriedades Mecânicas:

Nome	Número		+A+torneado	+A+estirado a frio	+FP+torneado	+FP+estirado a frio
		mm	Dureza HB máx	Dureza HB max	Dureza HB máx	Dureza HB máx
16 MnCrS5	1.7139	≥ 5 ≤ 10	-	260	-	-
		> 10 ≤ 16	-	250	-	-
		> 16 ≤ 40	207	245	140 - 187	140 - 240
		> 40 ≤ 63	207	240	140 - 187	140 - 235
		> 63 ≤ 100	207	240	140 - 187	140 - 235

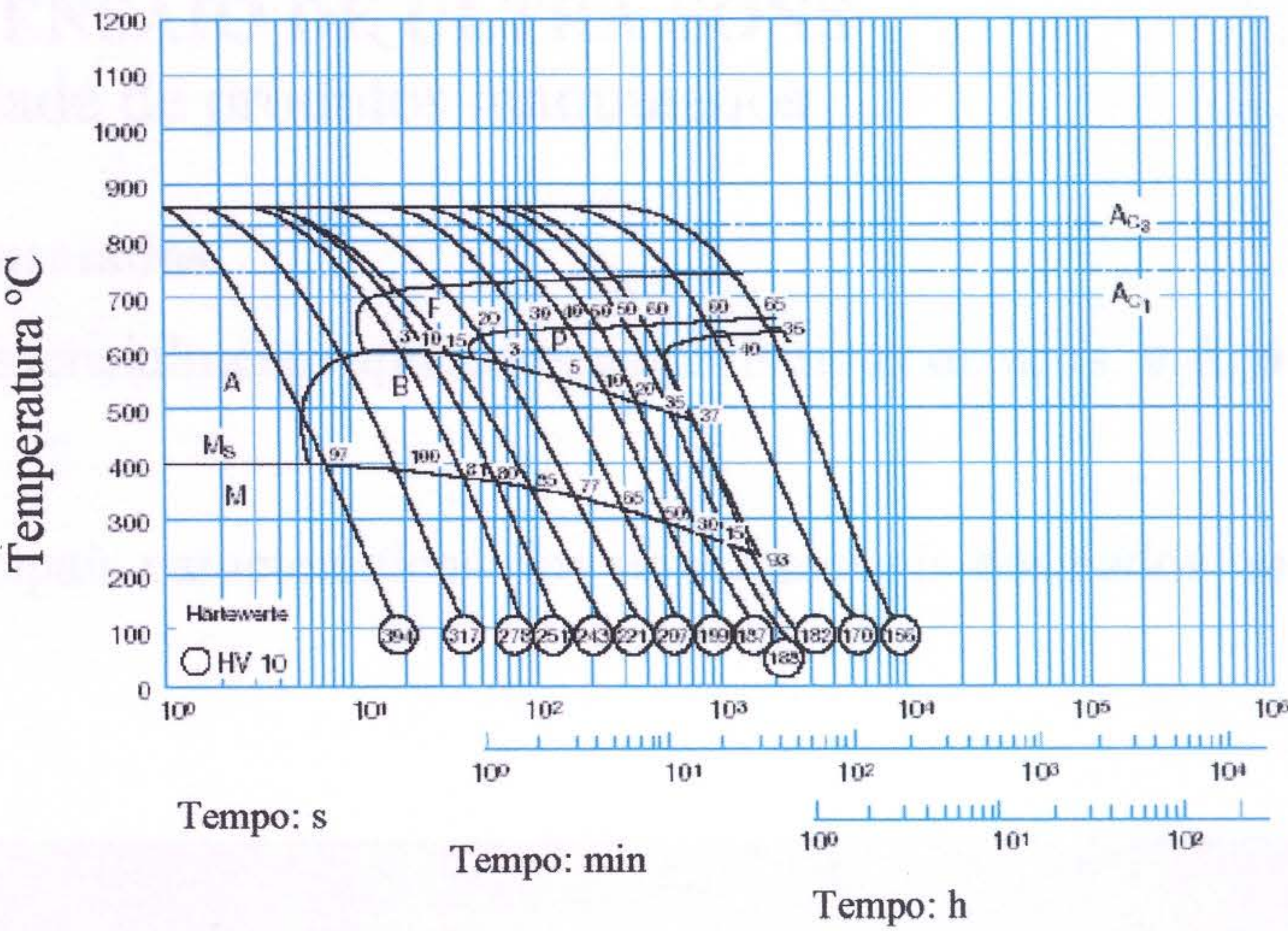
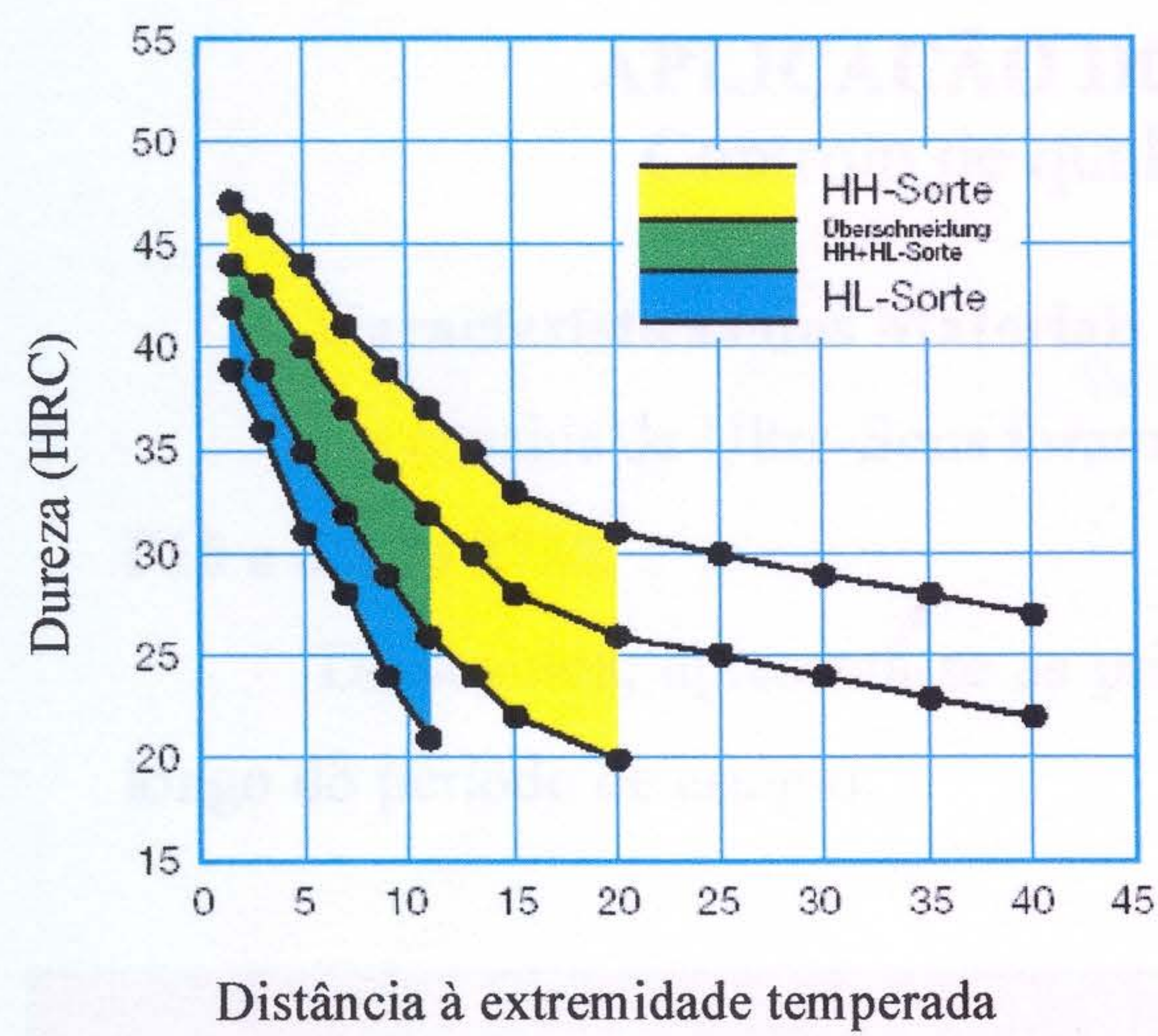
+A = Recozido para o requisito de dureza máxima

+FP = Tratado por uma estrutura ferrite-perlite + gama de dureza

Resultados do ensaio Jominy

ANEXO B

Curva TAC



ANEXO B

APLICAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SONS Controlo de qualidade de produtos maquinados

Características dos Materiais Ensaiaados

Os ensaios de Ultra-Sons foram essencialmente aplicados em dois tipos de aços: o Aço F10 e o Aço 2738.

De seguida, apresenta-se as principais características dos dois materiais ensaiados ao longo do período de estágio.

Classe	Marca	Normas					
		EURO/NORME	AISI	SS	AFNOR	DIN	WJ/NF
	2738	40CrMnNiMo8-6-4	(P20)			40CrMnNiMo8-6-4	1.2738
	F10	C 45 E	1045	1672	C 45 E	Ck 45	1.1191

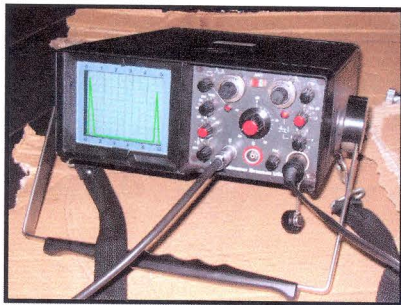
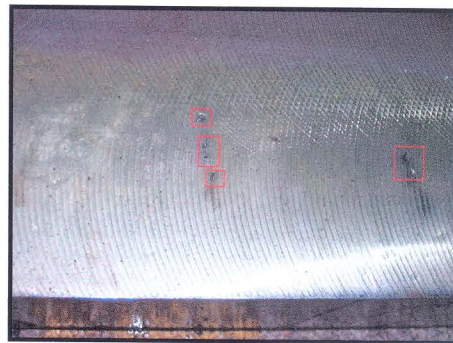
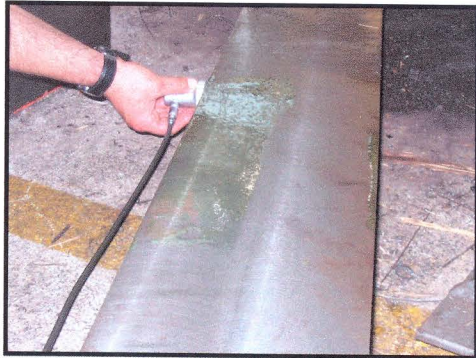
Marca	Composição Química						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Outros
2738	0,40	0,30	1,40	2,00	0,20	1,00	S≤0,010
F10	0,45	≤ 0,40	0,65	-	-	-	-

Marca	Características Mecânicas				Forjamento e Tratamento Térmico			
	Dureza (HB) Máx	RM Kg/mm ²	RP _{0.2} Kg/mm ²	A % L ₀ =5d ₀	Recozim. °C	Redução Tensões °C	Têmpera °C	Revenido °C
2738	290/345	100/115	≥ 95	≥ 12	700	550	850	180 650
F10	207	≥ 59	≥ 33	≥ 4	650-700 840-870		800 860	200 300

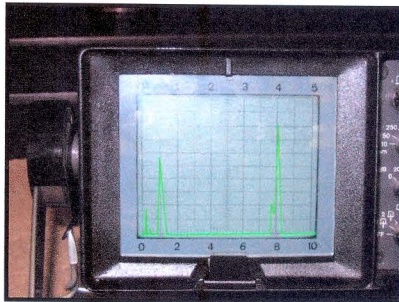
Marca	Principais Aplicações
2738	Moldes de aço pré-tratado para plásticos de injeção, compressão e sopro
F10	Estruturas para moldes

► Detecção de defeitos numa barra F10

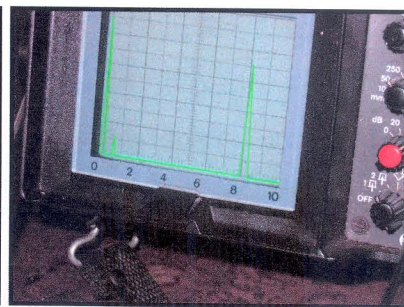
Barra aplicada no ensaio e exemplos de defeitos presentes no material



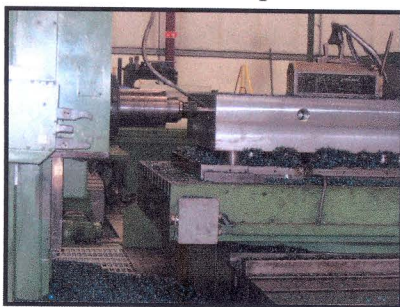
Comportamento do eco numa zona da barra sem defeitos



Comportamento do eco numa zona da barra com defeitos



Exemplos de blocos a serem maquinados: Aço 2738



Bloco pronto a ser inspeccionado



Aplicação do ensaio

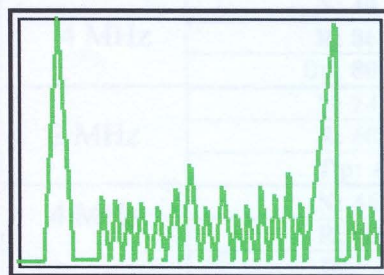
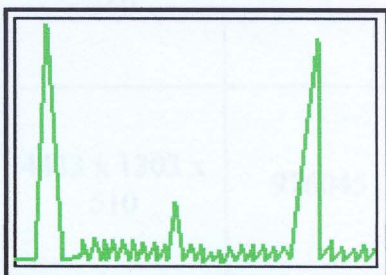
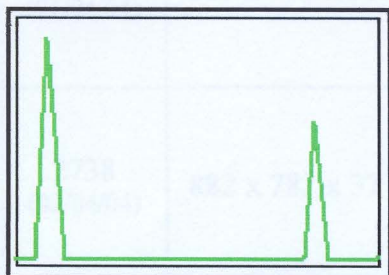


Ao longo do período de estágio foram realizados vários ensaios de ultra-sons, com o objectivo de registar o ganho correspondente às três situações seguintes:

N: Normal

Dp: Defeito Pontual

R: Relva



A situação “normal” corresponde à situação padrão, para a qual não se regista a presença de nenhuma descontinuidade. O aparecimento de “relva”, significa a amplitude máxima que se pode usar, ou seja, é o limite máximo para a detecção de uma descontinuidade. No caso de “defeito pontual”, significa que o aparelho detectou alguma descontinuidade no interior do bloco, no entanto esta descontinuidade terá que ser posteriormente avaliada, o que não significa que estamos perante a presença de um defeito. A avaliação é realizada com o auxílio das curvas DGS.

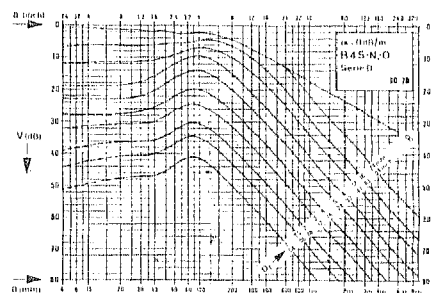
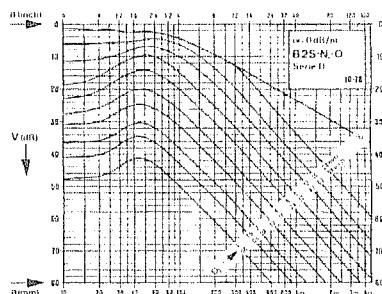
Ensaio realizado ao longo do Estágio

Marca	Dimensão peça maquinada	Dimensão peça original	Fornecedor	Sonda	Ganho (dB)
2738 (16/03/04)	596 x 496 x 276	3861 x 1305 x 500	976175	2 MHz	N: 24
					R: 60
					Dp: -
2738 (18/03/04)	896 x 696 x 270	2978 x 1306 x 692	976045	2 MHz	N: 22
					R: 56
					Dp: -
2738 (18/03/04)	896 x 696 x 246	3775 x 1985 x 252	976004	2 MHz	N: 22
					R: 56
					Dp: 46
2738 (18/03/04)	1200 x 700 x 651	3438 x 1308 x 705	976075	2 MHz	N: 36
					R: 56
					Dp: -
2738 (23/03/04)	996 x 646 x 246	5565 x 1262 x 258	976045	2 MHz	N: 22
					R: 58
					Dp: -
2738 (30/03/04)	1146 x 1096 x 346	3963 x 2023 x 355	976004	2 MHz Antes desbaste	N: 30
					R: 56
					Dp: 36
				2 MHz Após desbaste	N: 22
					R: 58
					Dp: 56

(continuação)

Marca	Dimensão peça maquinada	Dimensão peça original	Fornecedor	Sonda	Ganho (dB)
2738 (01/04/04)	882 x 782 x 332	5558 x 1489 x 350	976075	2 MHz	N: 24
					R: 58
					Dp: 54
				4 MHz	N: 40
					R: 86
					Dp: 80
2738 (02/04/04)	882 x 782 x 377	4433 x 1303 x 510	976045	2 MHz	N: 24
					R: 60
					Dp: -
				4 MHz	N: 46
					R: 90
					Dp: -
2738 (13/04/04)	1196 x 1096 x 446			2 MHz	N: 24
					R: 62
					Dp: 54
				4 MHz	N: 46
					R: 86
					Dp: 82
M238 (13/04/04)	1952 x 597 x 252	2431 x 604 x 267	976274	2 MHz	N: 18
					R: 64
					Dp: 58
				4 MHz	N: 42
					R: 86
					Dp: 80
M238 (29/04/04)	1797 x 1197 x 402	3750 x 1251 x 413	976045	2 MHz	N: 24
					R: 72
					Dp: -
				4 MHz	N: 42
					R: 88
					Dp: -
2738 (12/05/04)	1492 x 842 x 347	5638 x 1345 x 352	906075	2 MHz	N: 22
					R: 62
					Dp: 54
				4 MHz	N: 42
					R: 92
					Dp: 86

Os diagramas DGS foram preparados para facilitar a avaliação de uma série de parâmetros do ensaio ultra-sónico, relacionados com o material, o feixe sónico, o tamanho mínimo das descontinuidades detectáveis por uma determinada sonda, etc. Existe um diagrama DGS para cada tipo de sonda.



ANEXO C

Análise de Inclusões em aços pré-tratados

1. Norma de referência ASTM E-45

2. Resultados

Tabela 2. Análise metalográfica quantitativa realizada sobre 20 campos de observação (20 x 1mm²). Software – Paqui, disponibilizado pela feup

Aço	AREA (%)				CONTAGEM de INCLUSÕES (número/campo)				AREA OCUPADA/ INCLUSÃO (um2)			
	MIN	MAX	Média	σ	MIN	MAX	Média	σ	MIN	MAX	Média	σ
A	0,31	2,04	0,81	0,44	39	133	65,4	25,7	2,89	2015	93	226
B	0,33	1,76	1,03	0,42	20	221	94,3	52,5	2,89	6363	82	359
C	0,24	1,12	0,57	0,24	22	72	48,8	15,5	2,89	2797	88	266
S	0,17	0,48	0,32	0,09	32	101	62,4	19,2	2,89	661	38	44
D	0,19	1,82	0,75	0,50	12	234	42,0	46,5	2,89	7561	136	561

Tabela 3. Análise segundo padrões da ASTM E-45

Aço	Sulfuretos	Alumina	Silicatos	Oxidos
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
A	1	0,5	0	1 – 1,5
B	0,5 - 1	0	0	2 - 3
C	2 – 3	0,5	0	1
S	0,5	0	0	0,5
D	0,5	0,5	0	2 - 3

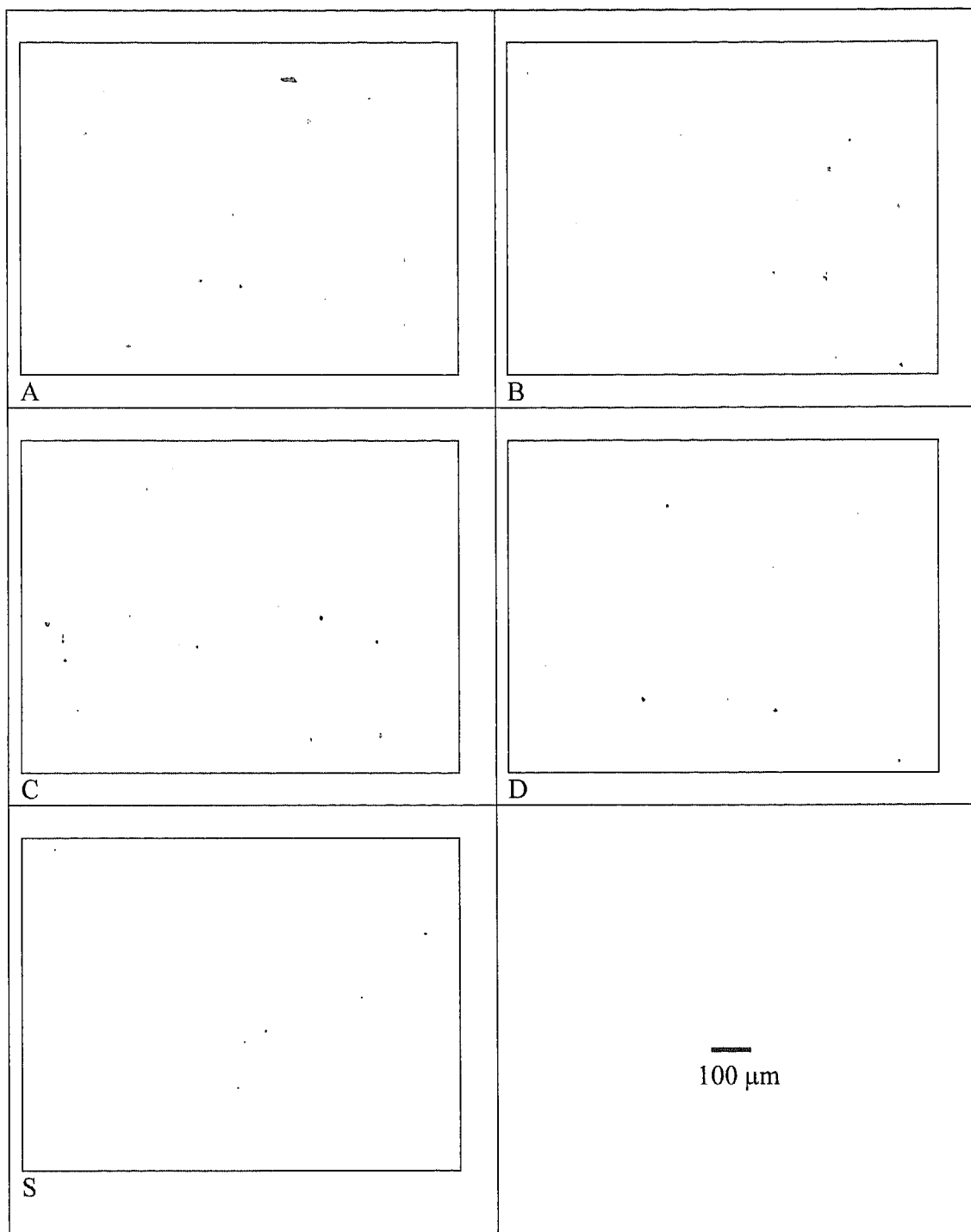


Figura 1 – Microestrutura das amostras analisadas.
 Inclusões - Partículas negras; Matriz - fundo branco não contrastado por ataque químico .



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000088380