

Estudo comparativo de fresas em carboneto de tungsténio

Em cooperação:
Inegi e Frezite

Aluno: Luís Miguel Cerqueira Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Jorge Lino Alves

Agradecimentos

A realização desta tese só foi possível com a colaboração de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de exprimir os meus agradecimentos:

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Lino, por todo o apoio, compreensão e disponibilidade que demonstrou, quer no fornecimento de material trabalho, quer nas opiniões sábias que me transmitiu e que foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

Em segundo lugar, um agradecimento muito especial ao amigo e colega de trabalho nesta tese, João Luís Guimarães, pela excelente colaboração, imprescindível para que os objectivos fossem atingidos.

Ao Prof. Dr. Monteiro Baptista, pela ajuda prestada, essencial para o progresso deste estudo.

À Frezite, pela partilha de ideias, pelo fornecimento dos materiais e pelo papel importante como impulsionador da investigação realizada.

À Vicaima, na pessoa do Eng.º Hamid, por ter disponibilizado os meios necessários à realização dos testes em ambiente real e pelo entusiasmo com que encarou esta análise.

Ao Inegi, pelos meios disponibilizados para a realização dos ensaios laboratoriais.

Por fim, agradeço à minha família e à minha namorada, por todo o incentivo e apoio que me transmitiram ao longo deste período.

Porto, 31 de Julho de 2008

Tese de: Luís Miguel Cerqueira Teixeira

Orientado por: Prof. Dr. Jorge Lino Alves

Assunto: Estudo comparativo de fresas em carboneto de tungsténio

O carboneto de tungsténio é o material mais utilizado para ferramentas de corte. O conhecimento das suas propriedades é fundamental para que a sua utilização no fabrico das ferramentas de corte seja a mais adequada. Desta forma, torna-se essencial conhecer parâmetros importantes como o tamanho de grão, a composição química ou a tenacidade, assim como a relação que existe entre eles.

Neste trabalho foi efectuada uma comparação entre diversas fresas, helicóides, em carboneto de tungsténio, tendo sido efectuada uma análise microestrutural juntamente com ensaios de desgaste, medições de rugosidade, de microdurezas e análise macrográfica para caracterizar cada uma das fresas em causa. De referir, que a geometria de cada fresa, assim como os parâmetros de corte utilizados no decurso dos testes em ambiente real, foram mantidos constantes, não sendo portanto, variáveis a considerar neste estudo comparativo. Os testes em ambiente real foram intercalados com medições de rugosidade e análise macrográfica para avaliar a evolução do desgaste em cada fresa. Das fresas testadas, aquela que demonstrou um melhor comportamento foi a CTS(KCR)06.

Índice

Nomenclatura	V
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte.....	2
2.1 Carbonetos Cementados.....	2
2.1.1 Produção de carbonetos cementados de tungstênio	4
2.1.1.1 Produção de pós de carboneto de tungstênio	4
2.1.1.2 Compactação dos pós de CW	7
2.1.1.3 Sinterização	9
2.1.1.4 Tratamento pós-sinterização	13
2.1.2 Carbonetos de tungstênio ligados.....	14
2.1.2.1 Ligas de carboneto de tungstênio, carboneto de titânio e cobalto (WC-TiC-Co)	15
2.1.2.2 Ligas de carbonetos de tungstênio, carboneto de titânio, carboneto de tântalo e cobalto (WC-TiC-TaC-Co)	15
2.1.3 Parâmetros microestruturais	16
2.1.3.1 Tamanho de grão	16
2.1.3.2 Contiguidade	19
2.1.3.3 Distância média do ligante	19
2.1.3.4 Fração volúmica	20
2.1.4 Propriedades mecânicas	20
2.1.4.1 Dureza	21
2.1.4.2 Tensão de ruptura transversal.....	23
2.1.4.3 Tenacidade	25
2.1.5 Classificação dos carbonetos cementados	27
2.1.6 Desgaste no trabalho de madeira e seus derivados	30
2.2 Madeira	33
2.2.1 Painéis de derivados de madeira	34
2.2.1.1 Painéis de madeira maciça	36
2.2.1.2 Contraplacado.....	37
2.2.1.3 Pannel microlamelado colado (LVL).....	38
2.2.1.4 Pannel de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB)	38
2.2.1.5 Painéis de aglomerados de partículas de madeira	39
2.2.1.6 Painéis de aglomerado madeira-cimento (CBPB).....	41
2.2.1.7 Painéis de aglomerados de fibras de madeira.....	41
3. Parte Experimental	45
3.1 Caracterização química e microestrutural	50
3.2 Dureza	54
3.3 Ensaio de desgaste.....	54
3.4 Medição de rugosidades	59
3.4.1 Rugosidade das pastilhas de desgaste	63

3.4.2 Rugosidade das fresas do 1ºconjunto	64
3.4.3 Rugosidade das fresas do 2º e 3ºconjuntos	66
3.5 Análise macrográfica.....	70
3.6 Testes em ambiente real	72
3.6.1 Medição de rugosidades	75
3.6.2 Análise macrográfica.....	80
4. Conclusões.....	86
5. Trabalhos futuros.....	90
6. Referências.....	91
7. Anexo.....	93

Nomenclatura

Lista de abreviaturas

<i>CBPB</i>	Painel de aglomerado madeira-cimento (<i>Cement Bonded Particle Board</i>)
<i>HIP</i>	Pressão isostática a quente (<i>Hot Isostatic Pressure</i>)
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>LVL</i>	Painel microlamelado colado (<i>Laminated Veneer Lumber</i>)
<i>MDF</i>	Painel de aglomerados de fibras obtidos por via seca (<i>Medium Density Fiberboard</i>)
<i>MUF</i>	Resina de melamina-ureia-formaldeído
<i>OSB</i>	Painel de aglomerados de partículas de madeira longas e orientadas (<i>Oriented Strand Board</i>)
<i>PF</i>	Resina fenol-formaldeído
<i>PMDI</i>	Resina de isocianato
<i>TRT</i>	Tensão de Ruptura Transversal
<i>UF</i>	Resina de ureia-formaldeído

Lista de símbolos

a	Média dos diâmetros medidos (método de esfera rotativa)
C_α	Contiguidade
d	Média das duas diagonais da indentação (dureza Vickers)
d_{Co}	Distância média do ligante
d_{WC}	Tamanho de grão (determinação da distância média do ligante)
f	Multiplicador de Jeffries (método de Jeffries)
F	Carga de indentação (dureza Vickers)
HV	Dureza Vickers
K_{lc}	Tenacidade (método de Palmqvist)
K_s	Coefficiente de desgaste (método de esfera rotativa)
L	Comprimento da linha de teste (método de Abrams)
\bar{l}	Valor médio de intercepções (método de Abrams)
L	Comprimento de base (medição de rugosidade)
L_i	Comprimento de todas as fissuras (método de Palmqvist)
L_m	Comprimento de cálculo (medição de rugosidade)
L_n	Último comprimento de palpagem (medição de rugosidade)
L_t	Comprimento de palpagem (medição de rugosidade)

L_T	Comprimento da linha de teste (método de Heyn)
L_v	Primeiro comprimento de palpagem (medição de rugosidade)
M	Ampliação (método de Abrams; método de Heyn)
N	Carga aplicada (método de esfera rotativa)
N_A	Nº de grãos por milímetro quadrado (método de Jeffries)
N_{inside}	Nº de grãos dentro do círculo delimitador (método de Jeffries)
$N_{intercept}$	Nº de grãos interceptados pelo círculo (método de Jeffries)
N_I	Nº de intercepções pelo círculos (método de Abrams)
N_L	Nº de intercepções por unidade de comprimento da linha de teste (método de Abrams)
$(N_L)_{\alpha\alpha}$	Número médio de intercepções, por unidade de comprimento das linhas de teste, das interfaces carboneto-carboneto (determinação da contiguidade)
$(N_L)_{\alpha\beta}$	Número médio de intercepções, por unidade de comprimento das linhas de teste, das interfaces carboneto-cobalto (determinação da contiguidade)
P	Nº total de superfícies de grão interceptadas (método de Heyn)
P_I	Nº de intercepções pelo círculos (método de Abrams)
P_L	Nº de superfícies de grão interceptadas pela linha de teste (método de Abrams; método de Heyn)
R	Raio da esfera (método de esfera rotativa)

R_a	Rugosidade média aritmética
R_{max}	Valor máximo da profundidade individual da rugosidade
R_z	Profundidade média da rugosidade
R_{zi}	Distância entre o maior pico e o maior vale no comprimento de base
S	Distância de escorregamento (método de esfera rotativa)
V	Volume desgastado (método de esfera rotativa)
V_{Co}	Fracção volúmica de cobalto
V_{WC}	Fracção volúmica de carboneto

1. Introdução

A diminuição dos custos de produção associada a um acréscimo de qualidade dos produtos é o objectivo de qualquer empresa. Actualmente não são só os aspectos técnicos que são importantes na selecção de uma ferramenta de corte. A utilização de uma ferramenta que se revela inadequada à função em causa, compreende desde logo custos adicionais e que podem ser evitados ou pelo menos minimizados. A escolha do material que constitui a ferramenta e a selecção desta, de acordo com o material a trabalhar, é assim essencial. Resulta deste ponto, toda a importância que deve ser dada às características físicas e químicas do carboneto de tungsténio. A combinação de uma elevada dureza e uma boa tenacidade fazem do carboneto de tungsténio um material com características excelentes para operações de corte e maquinagem dos mais diversos tipos de materiais. O carboneto de tungsténio é, nos dias de hoje, o material mais utilizado neste campo de aplicação. O conhecimento das suas características revela-se de vital importância, na medida em que, variações em parâmetros como o tamanho de grão ou o conteúdo de cobalto introduzem alterações significativas em propriedades como a dureza, a tenacidade ou a resistência ao desgaste. Desta forma, é possível obter carbonetos de tungsténio com comportamentos muito diferentes apenas variando um parâmetro. Podem ser encontrados carbonetos de tungsténio com a mesma composição química mas com desempenhos totalmente distintos, devido a diferenças no tamanho de grão.

Este projecto tem como objectivo a caracterização e análise comparativa de várias fresas helicóides em carboneto de tungsténio utilizadas no trabalho de derivados da madeira. Este estudo comparativo focou-se principalmente no carboneto de tungsténio utilizado em cada uma das diferentes fresas. Foi efectuada uma caracterização microestrutural, complementada com ensaios de desgaste, medição de rugosidades, medição de microdurezas, análise macrográfica e determinação da tenacidade. Adicionalmente foram levados a cabo ensaios em ambiente real de trabalho para analisar o comportamento ao desgaste das fresas quando em contacto com o material a maquinar. A geometria de algumas fresas foi também controlada, apenas com o propósito de avaliar a progressão do desgaste nas ferramentas, pois a geometria é semelhante em todas as fresas que foram ensaiadas em ambiente real, assim como os parâmetros de corte utilizados.

Pretende-se assim com este trabalho, fornecer à Frezite informação que se demonstre relevante no desenvolvimento de novas fresas helicóides para trabalhar derivados da madeira.

2. Estado da arte

O conhecimento da constituição e das propriedades do carboneto de tungsténio que é utilizado no fabrico de fresas para madeira é de extrema utilidade, pois todo o seu comportamento advém de uma conjugação de factores relacionados com a sua composição. É também importante perceber o seu processo de fabrico e a sua influência no resultado final do produto obtido. Nas secções seguintes é feita uma breve abordagem a esta temática.

Adicionalmente, face ao objectivo deste trabalho ser o estudo de fresas para derivados de madeira, achou-se conveniente a introdução de um capítulo sobre este assunto, fazendo referência aos principais painéis de derivados de madeira.

2.1 Carbonetos Cementados

A era moderna da pulverometalurgia foi iniciada por William Coolidge no ano de 1909 que usou pós de tungsténio no desenvolvimento de um filamento eléctrico dúctil em tungsténio maleável. No entanto, o carboneto de tungsténio foi pela primeira vez sinterizado em 1890 pelo químico francês Henri Moissan.

Entre 1914 e 1927 surgiram na indústria os primeiros pós em ligas de carboneto de tungsténio e cobalto, mais concretamente no fabrico de ferramentas. O alemão Schroeter, ao aplicar as técnicas da pulverometalurgia, conseguiu em 1923, obter o primeiro carboneto de tungsténio efectivamente consolidado usando como elemento aglutinador o cobalto. O carboneto de tungsténio com o cobalto como elemento aglutinador foi o primeiro carboneto cementado a ser produzido, que além das suas excelentes propriedades apresenta também um bom comportamento durante a sinterização. A elevada solubilidade do carboneto de tungsténio no cobalto a elevadas temperaturas e a boa molhabilidade do WC pelo cobalto resulta numa excelente densificação durante a fase líquida da sinterização permitindo obter uma estrutura “livre” de poros. Como resultado é alcançado um material que combina uma resistência, tenacidade e dureza elevadas. A combinação de elevadas durezas e uma boa tenacidade, fazem do carboneto cementado um dos materiais duros mais versáteis em aplicações de engenharia e maquinagem (fig. 2.1-1) [1].

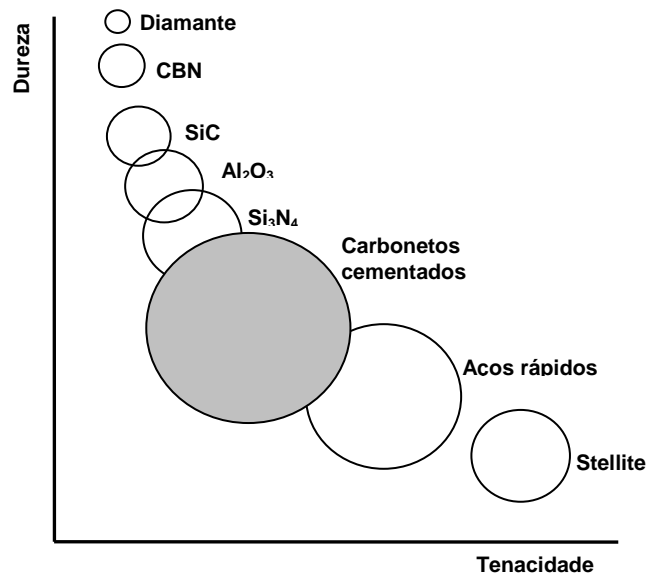


Figura 2.1-1 Dureza vs tenacidade. Carboneto cementado e outros materiais (*Sandvik Hard Materials*)

Os primeiros graus de carboneto de tungstênio-cobalto foram aplicados com sucesso no torneamento e fresagem de ferro fundido, no início da década de 30, o que funcionou como ponto de partida para o desenvolvimento de graus para a fresagem de aço, que em adição ao carboneto de tungstênio e ao cobalto, também continham titânio e tântalo. Nos dias de hoje, face à grande variedade de graus de carbonetos de tungstênio, o seu campo de aplicação é extremamente abrangente (fig. 2.1-2).

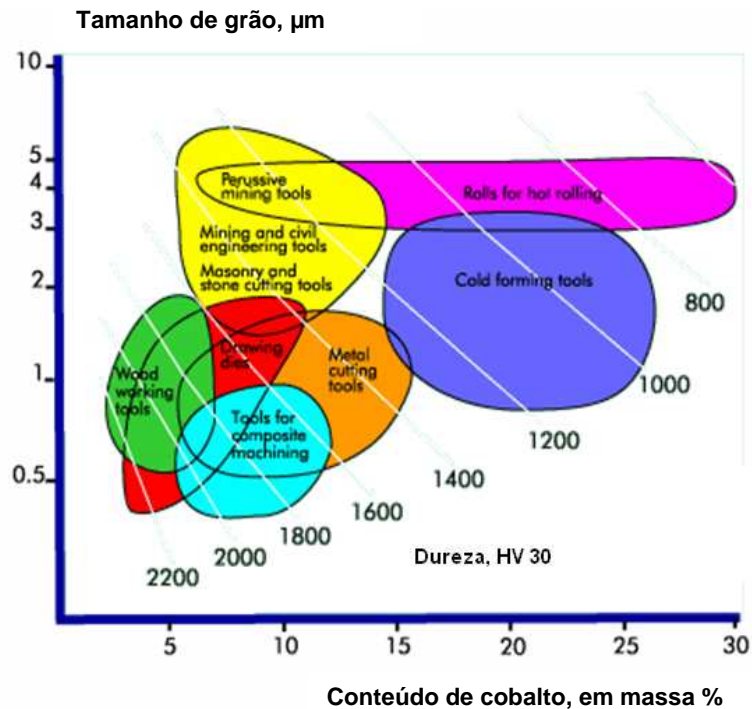


Figura 2.1-2 Aplicações de WC/Co de acordo com as suas características (*International Tungsten Industry Association*)

2.1.1 Produção de carbonetos cementados de tungsténio

O processo de fabrico dos carbonetos cementados está sujeito a um controlo rigoroso com o propósito de garantir padrões de qualidade elevados. A composição química e microestrutura que são obtidas representam um papel essencial no desempenho do carboneto. As principais etapas do processo de fabrico de peças em carboneto cementado são [2]:

-Processamento do minério e produção dos pós de WC;

-Compactação dos pós de WC;

-Sinterização;

-Tratamento pos-sinterização.

2.1.1.1 Produção de pós de carboneto de tungsténio

O material base para a obtenção do carboneto cementado é o minério de tungsténio concentrado. Dos 39 minerais de tungsténio existentes, apenas dois têm interesse comercial: a *scheelite* (tungstato de cálcio- CaWO_4) e a *volframite* (tungstato de ferro-manganês- FeWO_4 , MnWO_4). É a partir destes dois minerais que se obtém o tungsténio.

Numa primeira fase, o minério de tungsténio é processado quimicamente por forma a alcançar o paratungstato de amónia, e deste obter os óxidos de tungsténio. Os pós de tungsténio (fig. 2.1-3) são obtidos a partir da redução dos óxidos de tungsténio com hidrogénio.

Através da variação das condições em que se dá a redução, podem ser produzidos pós com diferentes tamanhos de grão. Quando a redução é realizada com excesso de hidrogénio, a baixa temperatura e com uma pequena quantidade de óxidos de tungsténio, é obtido pó de tungsténio com o grão fino. Numa situação oposta, o grão do pó produzido será mais grosseiro, havendo, no entanto, a possibilidade do tamanho de grão ser controlado com mais facilidade [3].



Figura 2.1-3 Matérias-primas para a produção de carbonetos cementados (*Sandvik Hard Materials*)

O passo seguinte é a produção do carboneto de tungsténio. Antes da carbonização é efectuada a mistura do tungsténio (W) e do carbono (C), sendo a escolha do método a utilizar importante, pois o tamanho de grão pode ser bastante afectado nesta operação. O carbono a aplicar deverá ser de alta qualidade, com poucas cinzas e com baixa percentagem de enxofre. O conteúdo de cinzas, normalmente 0.1%, é uma medida do nível de impureza. O enxofre é uma impureza comum no carbono, e pode ter efeito considerável no tamanho do grão, sendo desejável que o seu teor se situe em valores abaixo dos 0.01%.

O controlo do conteúdo de carbono é crítico. O conteúdo de carbono deve ser mantido dentro de limites apertados. O carbono em excesso resulta na presença de grafite dispersa, que em pequenas quantidades não produz efeitos adversos em aplicações de maquinagem. No entanto, insuficiência no conteúdo de carbono resulta na formação de carbonetos duplos ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ou $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$), conhecidos como fase η , “eta”, que originam a fragilização do carboneto. Como a formação da fase η envolve a dissolução dos carbonetos originais no cobalto, a fase η aparece numa forma irregular na microestrutura. Face a estas alterações na estrutura do carboneto, a tenacidade da pastilha de corte, assim como a sua resistência ao desgaste irão ser afectadas de forma negativa. Mesmo dentro das gamas aceitáveis, a variação da percentagem de carbono tem influência directa na resistência do carboneto.

No que se refere à concentração de impurezas presentes na mistura, há uma diminuição durante a carbonização pelo facto das temperaturas atingidas (1400-1800°C) serem superiores às temperaturas de redução (700-1000 °C). Pós de tungsténio mais grosseiros são mais “puros” do que os mais finos, fruto de temperaturas de redução mais elevadas a que foram sujeitos. Quanto mais “puro” for o tungsténio, maior será o crescimento de grão durante a carbonização. As impurezas diminuem a taxa de crescimento de grão. A tabela 2.1-1 enumera algumas impurezas e a sua influência no crescimento de grão. De salientar que o silício apresenta resultados diferentes de estudo para estudo, podendo também funcionar como inibidor do crescimento de grão.

Tabela 2.1-1 Elementos inibidores e promotores do crescimento de grão [5]

Efeito no crescimento de grão	Elemento
Inibidor	Bi, Al, B, U, Li, Na, K, Be, Mg, Ca, Sr, Ba
Promotor	Si, S

A mistura de tungsténio (W) e carbono (C) é aquecida numa atmosfera de hidrogénio, estando sujeita neste processo a temperaturas entre os 1400 e os 1800 °C, podendo o tamanho de grão ser afectado com a variação da temperatura de carbonização. A carbonização é muita vezes entendida como a simples transformação das partículas de tungsténio em partículas de carboneto de tungsténio. Isto é verdade quando aplicável exclusivamente em partículas de tungsténio bastante finas (< 2.5µm).

Quando a carbonização é realizada até 1500 °C dá-se um crescimento de grão devido à menor densidade das partículas do WC relativamente às partículas de tungsténio. Acima de 1500 °C, o fenómeno de crescimento de grão é completamente diferente, resultado de outros mecanismos que ocorrem, sendo este crescimento mais vincado quando a temperatura atinge os 1700 °C. O crescimento súbito de grão perto dos 1700 °C é mais notado para grão fino do que para grão mais grosseiro, onde o crescimento de grão é mais uniforme e estável. Ou seja, com o aumento da temperatura de carbonização há uma alteração na forma do carboneto. De referir também, que quando a carbonização é realizada a baixas temperaturas (1300 °C), o aglomerado que daí resulta, apresenta menos susceptibilidade ao crescimento local do grão durante a sinterização, ao passo que quando são atingidas temperaturas na ordem dos 1600 °C é obtido um aglomerado de elevada consistência que pode levar ao crescimento local do grão com os cristais produzidos a originarem baixa reactividade durante a sinterização [4, 5].

Quando as partículas de tungsténio têm tamanhos superiores a 2.5µm, durante a carbonização ocorrem fenómenos que podem afectar o tamanho de grão final do metal duro. Nesta situação, o domínio monocristalino do carboneto de tungsténio é influenciado por vários parâmetros, sendo o mais importante a temperatura. Temperaturas elevadas, com taxas de difusão do carbono superiores, originam maiores domínios monocristalinos. O tamanho deste domínio nas partículas de WC actua na microestrutura do WC-Co sinterizado e não no tamanho da partícula de WC.

As partículas de WC que são obtidas apresentam dimensões entre os 0.5 e os 30µm. Pequenas quantidades de vanádio, crómio ou tântalo podem ser adicionadas ao carbono e ao tungsténio

antes da carbonização, para produzir pós de WC com grão muito fino ($<1\mu\text{m}$). Investigações demonstraram que o uso combinado de VC e Cr_3C_2 como inibidores de crescimento de grão, não só promovem uma microestrutura mais homogénea, como também melhoram a dureza e a tenacidade do carboneto cementado [6].

Nos anos mais recentes, o carboneto de tungsténio passou a ser produzido na forma de cristais através da redução directa do minério de tungsténio (*scheelite*). O minério é misturado com óxido de ferro, alumínio, carbono e carboneto de cálcio. Uma reacção exotérmica a temperaturas elevadas produz uma massa fundida, que depois de arrefecida se resume a cristais de carboneto de tungsténio dispersos em ferro e numa escória com impurezas. É feita a separação química da matriz de ferro, conseguindo-se assim, os cristais de carboneto de tungsténio.

Outros carbonetos, de tungsténio-titânio-tântalo (nióbio), são aplicados em ferramentas para corte de aço com o objectivo de resistir ao desgaste químico, sendo produzidos a partir de óxidos de titânio, tântalo e nióbio. Estes óxidos são combinados com o pó de tungsténio e com carbono, e a mistura é aquecida numa atmosfera de vácuo ou hidrogénio para reduzir os óxidos e formar uma solução sólida de carbonetos. Por exemplo, o WC-TiC, WC-TiC-TaC, ou WC-TiC-(Ta, Nb)C [1].

2.1.1.2 Compactação dos pós de CW

Para a formação do aglomerado, o agente de aglutinação (normalmente o cobalto) é adicionado ao carboneto de tungsténio sob a forma de pós finos. Estes dois materiais passam depois por um moinho rotativo ou vibratório (mais eficiente) até se obter um produto homogéneo e uniforme. No processo de moagem, a quantidade de esferas em carboneto de tungsténio que é introduzida no moinho deve ser tal, que o seu peso total seja 2.5 a 3.0 vezes superior ao peso total dos pós a misturar. A uniformidade da distribuição do cobalto está associada às propriedades mecânicas e à eliminação da porosidade dos produtos sinterizados. Além da redução dimensional das partículas, o objectivo principal da operação de moagem/mistura é garantir que todas as partículas de carbonetos estão revestidas com cobalto (agente aglutinador).

Durante este processo é adicionado um líquido orgânico, por exemplo, o heptano ou a acetona, para minimizar o aquecimento dos pós e para prevenir a oxidação. Depois da moagem, o líquido orgânico é removido aplicando uma de várias técnicas, como a decantação ou a secagem por sopro. Com excepção das misturas que irão ser prensadas a quente adiciona-se um lubrificante,

habitualmente parafina, nas etapas finais do processo de moagem. O lubrificante para além de fornecer uma camada protectora nas partículas de carbonetos e reduzir a possibilidade de oxidação dos pós, introduz resistência à mistura. A parafina vai facilitar a prensagem e introduz alguma resistência ao estado verde, prevenindo assim danos na movimentação dos compactos. Após a operação de prensagem, a parafina é eliminada. Dos vários métodos para a sua eliminação, o mais usual é a volatilização através do aquecimento dos compactos quer em hidrogénio, quer em vácuo. É fundamental que a remoção da parafina seja efectuada sem provocar alterações físicas ou químicas no carboneto [4, 5].

Após a mistura com os aglutinantes, o passo seguinte é a compactação dos pós de carboneto cementado, efectuando uma prensagem dos mesmos. É importante ter em conta que durante a prensagem se assumem as formas mas não a dimensão final. A matriz usada no decorrer da prensagem deverá ter dimensões superiores às desejadas no produto final, pois a mistura compactada tem um índice de porosidade na ordem dos 50%. Durante a sinterização a porosidade vai ser eliminada, estando na origem de uma contracção linear de 17 a 20% [2].

Para a prensagem dos carbonetos cementados em verde são utilizados meios hidráulicos ou mecânicos. Com pressões elevadas há uma distribuição desigual de densidade, que pode levar à ruptura após o decréscimo de pressão, devendo ser utilizados valores de pressão razoáveis. É normalmente aplicada prensagem a frio uniaxial, com valores na ordem dos 50 a 150MPa. A densidade do aglomerado aumenta quando as pressões aplicadas são mais elevadas, sendo que nesta situação há mais desgaste do molde. Para pressões mais baixas, a distorção e a porosidade dos componentes é superior.

Um método alternativo é efectuar a prensagem a frio (temperatura ambiente) de forma isostática, onde os pós estão sujeitos à mesma pressão em todas as direcções, o que resulta numa peça com uma densidade mais regular, apresentando propriedades no estado sinterizado mais uniformes, especialmente em componentes com mais dimensão. A vantagem mais evidente deste processo é que após a sinterização a contracção ocorre de forma igual em todas as direcções, ao contrário do que acontece em situações onde a pressão nos compactos foi aplicada de forma uniaxial.

Quando as formas são complexas e os métodos convencionais não conseguem apresentar bons resultados na compactação é utilizada a extrusão, onde os carbonetos cementados são misturados com um polímero plastificador [4].

2.1.1.3 Sinterização

É provavelmente a etapa mais crítica no fabrico de metais duros, pois a sinterização e a consolidação são processos ainda não entendidos na sua totalidade. A sinterização é um processo complexo que decorre a temperaturas elevadas, onde há a consolidação e o aumento da resistência das partículas de pó ou dos compactos de partículas de pó através da formação de um conjunto mais denso e coerente. Durante a sinterização as partículas de pó formam ligações coesas e há densificação através da eliminação dos poros. Neste processo são atingidas temperaturas normalmente abaixo do ponto de fusão do constituinte maioritário do composto.

A sinterização dos carbonetos cementados consiste fundamentalmente na remoção do lubrificante, na densificação e no desenvolvimento microestrutural do composto. É usual combinar estas operações num único ciclo de aquecimento, diminuindo o gasto de energia associada ao processo.

Os compactos prensados possuem formas básicas (cilíndricas, esféricas) e são maquinados (torneamento, furação, esmerilagem, fresagem, etc.) antes do processo de sinterização, por forma a adquirirem a configuração desejada. Estas operações não podem descurar o efeito de redução das dimensões dos compactos durante a sinterização. Para possibilitar estas operações é realizado um tratamento para aumentar a resistência dos componentes, denominado pré-sinterização, onde estes são aquecidos até temperaturas entre os 750 e os 1000°C. Para os carbonetos de tungsténio-cobalto, temperaturas na gama dos 800°C são suficientes para introduzir a resistência necessária à maquinagem. A atmosfera gasosa que rodeia os compactos se não for inerte reage com estes e o conteúdo de carbono e oxigénio pode ser alterado durante o aquecimento até à temperatura de pré-sinterização. Se este processo se desenrolar debaixo de uma atmosfera de hidrogénio, os óxidos de cobalto e tungsténio são totalmente reduzidos a uma temperatura mínima de 700°C. Nesta fase há também a remoção do lubrificante, resultado da sua queima [5].

Após a remoção do lubrificante, os compactos são aquecidos até se atingir a gama de temperaturas de sinterização entre os 1350°C (para carbonetos muito tenazes com cerca de 30% de Co) e os 1650°C (para graus com elevada dureza com conteúdo de Co < 3%) A temperatura de sinterização depende portanto da quantidade de cobalto e também da microestrutura desejada (tabela 2.1-2). O tempo e a temperatura devem ser cuidadosamente controlados, por forma a otimizar as propriedades e satisfazer as tolerâncias geométricas.

Tabela 2.1-2 Temperaturas de sinterização típicas para vários graus de WC em atmosfera de hidrogénio (*European Powder Metallurgy Association*)

Composição (%)					Temp. de Sinterização
WC	TiC	Ta(Nb)C	Cr ₃ C ₂	Co	°C
94	-	-	-	6	1540
91	-	-	-	9	1480
89	-	-	-	11	1460
87	-	-	-	13	1450
80	-	-	-	20	1400
75	-	-	-	25	1380
70	-	-	-	30	1350
96.5	-	-	0.5	3	1640
95	-	-	0.5	4.5	1620
93.5	-	-	0.5	6	1560
90.5	-	-	0.5	9	1500
85.5	7	3.5	-	4	1640
81.5	7	3.5	-	8	1560
80	14	-	-	6	1620
84	10	-	-	6	1600
87	7	-	-	6	1590
87	5	-	-	8	1550
66	25	-	-	9	1620

São utilizados dois métodos na sinterização dos carbonetos cementados: sinterização sob hidrogénio e sinterização sob vácuo. A aplicação da *sinter-HIP* e a pressão isostática a quente (*HIP-hot isostatic pressure*) têm marcado posição na produção de carbonetos cementados para aplicações especiais.

Sinterização sob hidrogénio

Durante a sinterização sob hidrogénio, uma atmosfera de hidrogénio promove um ambiente de redução que permite a correcta carbonização e oxidação. Na sinterização sob hidrogénio o conteúdo de carbono é ajustado para o valor nominal, sendo mantido ao longo do ciclo de sinterização pela atmosfera de hidrogénio. Este método é adequado para os carbonetos cementados básicos (WC-Co), mas devido ao seu potencial de oxidação ser demasiado elevado, não é indicado para composições que contêm adições de TiC, TaC ou NbC, que são usuais em ferramentas para a maquinaria de metais. O oxigénio presente é reduzido a vapor de água e é eliminado do processo sem afectar a composição de carbono. Para adquirir menores conteúdos de oxigénio estes compostos são sinterizados sob vácuo.

Sinterização sob vácuo

O método mais utilizado é a sinterização sob vácuo devido às vantagens que apresenta relativamente ao método descrito anteriormente. Com valores de pressão baixos, a taxa de reacção do carbono e do oxigénio com a atmosfera envolvente é baixa. Devido ao baixo potencial de oxidação é mais adequado para a sinterização de TiC, TaC e NbC que são muito sensíveis ao potencial de oxidação. Outra vantagem da sinterização por vácuo é pelo facto de ser um método que funciona por lotes e não ser um processo contínuo como a sinterização sob hidrogénio. Desta forma é realizado um controlo mais apertado do ciclo térmico, particularmente na etapa de aquecimento. Uma taxa de aquecimento lenta e controlada, juntamente com uma estabilização a uma temperatura intermédia é indispensável para garantir a qualidade quando há adições de TiC, TaC ou NbC à composição do carboneto cementado. Este estágio permite que ocorram as reacções entre o carbono e o oxigénio e que o monóxido de carbono que se forma escape por entre os espaços livres ainda existentes. Se a temperatura tivesse uma subida muito rápida, o gás ficaria retido e daria origem a porosidades. Os custos operacionais deste método são inferiores ao processo de sinterização sob hidrogénio [3].

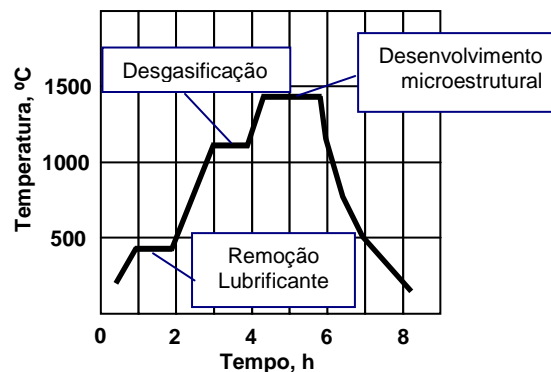


Figura 2.1-4 Exemplo de ciclo de sinterização sob vácuo (temperatura/tempo) [3]

À temperatura de sinterização dá-se a eliminação praticamente total dos poros, sendo atingida a densidade máxima do componente. As dimensões vão diminuir cerca de 15% e o volume 40% [4]. A maioria dos carbonetos cementados assumem a sua forma final por volta dos 1300°C [2].

Prensagem a quente (Hot Pressing)

A prensagem a quente é um processo que envolve a aplicação simultânea de pressão e temperatura para consolidar os pós e obter valores próximos da densidade máxima. A prensagem

a quente envolve a compressão de pós ou a recompressão dum compacto de pós, por forma a que se ajustem à cavidade resultando numa deformação lateral mínima. A prensagem é efectuada com recurso a equipamentos hidráulicos ou pneumáticos em detrimento de meios mecânicos, pois os tempos de prensagem podem ser longos, com a necessidade dum controlo apertado sobre a carga axial, de modo a garantir que uma pressão constante e que o ciclo pressão/temperatura são mantidos no decurso da operação de prensagem. O acto de prensagem, na prensagem a quente, é similar à prensagem a frio, com os pós a serem colocados numa matriz sofrendo uma pressão uniaxial, com os poros e os vazios a sofrerem um colapso na mesma direcção. Exceptuando no caso da fase de compactação dos pós, a introdução de partículas de pó na matriz não é viável. Na prensagem a quente a matriz é aquecida até à temperatura de prensagem, as partículas de pó ao serem introduzidas aumentam rapidamente a sua temperatura, aderindo entre si ou à superfície da matriz, impedindo o normal fluxo de pó para o interior da matriz. Uma opção é o preenchimento da matriz a frio e depois aquecer simultaneamente o pó e a matriz antes de se efectuar a prensagem. Uma segunda opção é a formação do compacto em verde para um melhor manuseamento. O compacto, que pode estar à temperatura ambiente ou ser pré-aquecido, é colocado na matriz, à temperatura ambiente ou pré-aquecida. Com o compacto na matriz, a temperatura pode ser elevada até à temperatura de prensagem. O aquecimento pode ser feito directamente por indução ou com recurso a resistências eléctricas, ou indirectamente por transferência de calor pela matriz aquecida por outros meios. Esta abordagem elimina o fluxo de pó a temperaturas elevadas. A atmosfera que circunda o pó deve ser controlada durante a prensagem a quente. O gás pode estar contido na cavidade ou envolver todo o conjunto, mediante a colocação deste numa câmara. A aplicação de vácuo na atmosfera ou a utilização de um gás inerte (árgon) são opções para criar uma atmosfera controlada. A produção de carbonetos de tungsténio é aquela que mais recorre ao processo de prensagem a quente. Os pós de carboneto de tungsténio são prensados a quente em matrizes de grafite a 1400°C com pressões até 17MPa. Pressões mais elevadas podem danificar o molde de grafite ou originar a extrusão do ligante (cobalto) entre o punção e a matriz. Se as pressões forem demasiado baixas os níveis de porosidade mantêm-se e podem ocorrer distorções na sinterização durante a densificação [3]. Este método é aplicado em peças com dimensões superiores ou com bastante complexidade.

Sinter-HIP

A *sinter-HIP* é realizada num forno de sinterização contido num recipiente de pressão intermédia. À temperatura de sinterização dá-se a pressurização quando o aglutinador metálico ainda se encontra na fase líquida, reduzindo ou eliminando a porosidade remanescente pela aplicação da pressão isostática. Um ciclo de sinterização por este método inclui a remoção do lubrificante, a

redução dos óxidos e a sinterização, seguida da aplicação de uma pressão isostática a quente com baixa pressão. A pressão é aumentada progressivamente até um nível superior. O custo de um ciclo de sinterização por *sinter-HIP* é superior ao verificado em unidades convencionais de vácuo com a mesma capacidade [3].

HIP-Prensagem isostática a quente

Uma operação de pós-sinterização é a prensagem isostática a quente (*HIP-hot isostatic pressing*) onde se dá a compactação dos pós de carboneto de tungstênio em moldes de grafite. Nas situações onde a porosidade reduz a resistência e em aplicações onde o acabamento superficial é um factor importante, a aplicação deste método faz com que a porosidade seja reduzida ao mínimo. Os carbonetos já sinterizados são aquecidos novamente a uma temperatura entre 25 a 50°C abaixo da temperatura de sinterização e são sujeitos a uma pressão isostática (100 a 150 MPa) em meio inerte (árgon). As altas temperaturas e pressões que são aplicadas eliminam porosidades residuais internas, fendas e imperfeições. No entanto, apesar da qualidade final apresentada ser superior à pressão a frio, ainda subsistem pequenas falhas. As principais imperfeições são a heterogeneidade estrutural e a irregularidade na distribuição do cobalto. Paralelamente, não se podem desprezar os custos associados a um novo aquecimento em atmosfera controlada.

A aplicação de *sinter-HIP* e da pressão isostática a quente (*HIP*) resulta num investimento superior quando comparado com os outros métodos convencionais, mas no entanto é conseguida uma resistência superior nos carbonetos que são obtidos. Este aumento de resistência é superior para materiais com pequeno tamanho de grão, baixo conteúdo de ligante (3-8%) e com pequenas quantidades de carbonetos cúbicos [3].

2.1.1.4 Tratamento pós-sinterização

Após a sinterização, há produtos que necessitam de sofrer intervenções, para que possam alcançar os requisitos exigidos, e que não são atingidos no decorrer do processo de fabrico. Os carbonetos são maquinados (rectificação e polimento) recorrendo a ferramentas à base de diamante ou carboneto de silício para atingirem a forma, o acabamento superficial e as tolerâncias geométricas desejados. Estas operações são dispendiosas e consumidoras de tempo. A figura 2.1-5 apresenta um esquema do ciclo completo de produção de peças em WC.

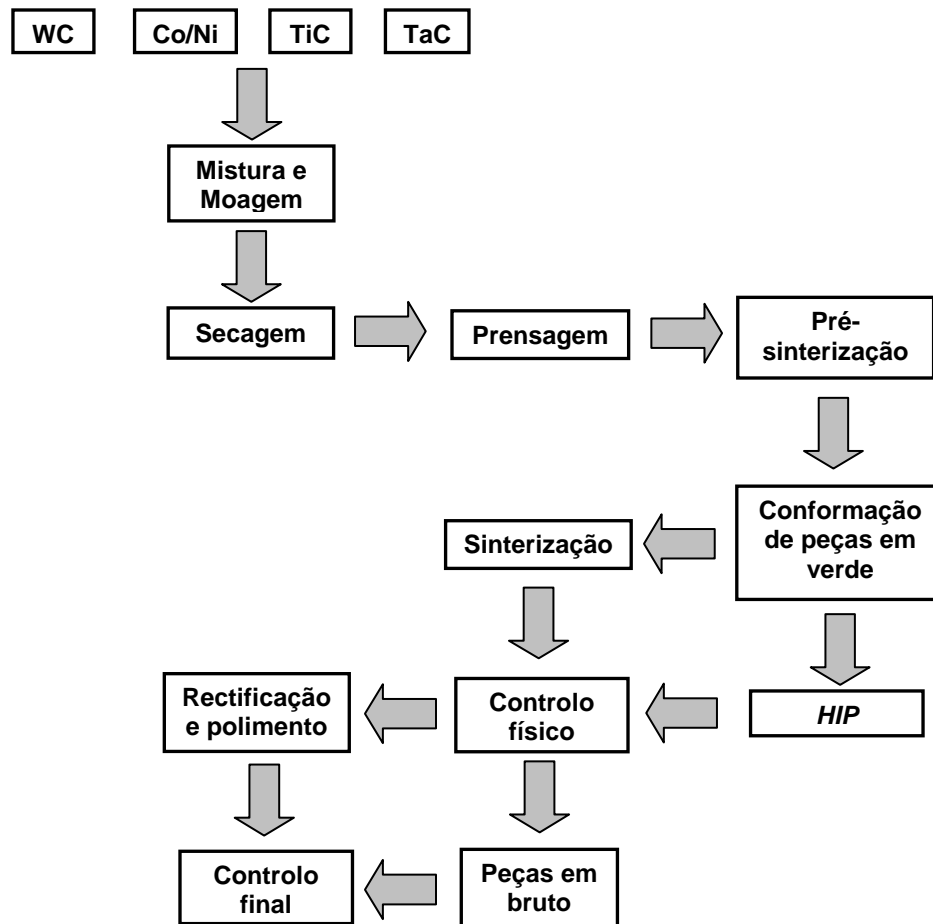


Figura 2.1-5 Esquema simplificado de processo de produção de WC (*Durit*)

2.1.2 Carbonetos de tungstênio ligados

Os primeiros carbonetos cementados disponíveis comercialmente foram os aglomerados de WC-Co, possuindo uma excelente resistência ao desgaste abrasivo, sendo por isso muito utilizados no corte de metais. Para aplicações (furação ou fresagem) que exigem carbonetos com uma resistência superior, particularmente na aresta de corte, são adicionadas pequenas quantidades de tântalo, nióbio ou crómio para refinar o grão. Estas adições podem ser efectuadas antes da carbonização ou na fase de aglutinação dos pós. O carboneto de vanádio é o inibidor de crescimento de grão mais eficaz, enquanto o carboneto de crómio, para além de ser um inibidor eficiente, introduz benefícios nas propriedades mecânicas do carboneto. O carboneto de tântalo não é tão eficaz como os carbonetos de crómio e vanádio.

Em aplicações onde predominam factores de desgaste, como a adesão e a difusão, paralelamente com grandes forças de corte e elevadas temperaturas são usados os carbonetos de tungsténio, ligados com carboneto de titânio e com carboneto de tântalo [4, 5].

2.1.2.1 Ligas de carboneto de tungsténio, carboneto de titânio e cobalto (WC-TiC-Co)

As ligas de carboneto de tungsténio e cobalto demonstraram um comportamento superior aos aços rápidos na maquinagem de ferros fundidos e materiais não ferrosos, com a possibilidade da aplicação de velocidades de corte mais elevadas. No entanto, são sujeitas a ataque químico e desgaste por difusão quando utilizadas no corte de aço. Como tal, as ferramentas falhavam a velocidades não muito superiores às aplicadas com os aços rápidos. Este facto esteve na origem do desenvolvimento das ligas de WC-TiC-Co.

O tungsténio difunde-se rapidamente na peça de corte, provocando desgaste e difusão entre a peça e a ferramenta. O carboneto de titânio reduz significativamente este processo de desgaste. Para além deste aspecto, a adição de carboneto de titânio melhora a dureza a quente do aglomerado. O carboneto de titânio e a solução de WC-TiC são, no entanto, mais frágeis e menos resistentes à abrasão. A quantidade de carboneto de titânio é por esta razão mantida no mínimo, normalmente abaixo dos 15%. O conteúdo de carbono nestas ligas é menos crítico, não se esperando a formação da fase η e a grafite livre raramente aparece.

2.1.2.2 Ligas de carbonetos de tungsténio, carboneto de titânio, carboneto de tântalo e cobalto (WC-TiC-TaC-Co)

A adição de TaC às ligas de WC-TiC-Co permite minimizar o efeito negativo do TiC na resistência do WC-Co, aumentando a tensão de ruptura à temperatura de maquinagem. O carboneto de tântalo possui também uma boa resistência ao desgaste de cratera e ao choque térmico. Normalmente o TaC é adicionado na forma de (Ta,Nb)C devido à grande afinidade química entre o TaC e o NbC, o que torna onerosa a separação do TaC. O NbC tem um efeito semelhante ao TaC nas propriedades do carboneto. A concentração de TaC depende do material base, da composição desejada, das propriedades e da microestrutura. As ligas de WC-TiC-(Ta,Nb)C-Co exibem na sua microestrutura três fases distintas: grão angular de WC, grão mais arredondado de WC-TiC-(Ta,Nb)C e o agente aglutinador, cobalto.

2.1.3 Parâmetros microestruturais

A análise da microestrutura dos carbonetos cementados permite-nos caracterizar as suas propriedades e o seu desempenho. Torna-se, assim, de vital importância a caracterização microestrutural do carboneto.

Para uma caracterização microestrutural dos carbonetos cementados é essencial definir quatro parâmetros, a saber [5]:

- Tamanho de grão;
- Contiguidade do carboneto;
- Distância média do ligante;
- Fração volúmica das fases.

Toda esta análise é suportada por uma análise visual recorrendo a equipamentos ampliadores, como microscópios ópticos e microscópios electrónicos de varrimento.

2.1.3.1 Tamanho de grão

O tamanho de grão é, para além do conteúdo de carbono, o parâmetro que durante o processo de produção sofre um controlo mais apertado. Nos dias de hoje e face às mais diversas aplicações onde o carboneto de tungsténio está presente, podem ser encontrados tamanhos de grão que vão desde os $0.5\mu\text{m}$ até $50\mu\text{m}$. O tamanho de grão, juntamente com o conteúdo de cobalto e os aditivos que podem ser introduzidos na composição do carboneto, desempenha um papel preponderante nas características finais do carboneto de tungsténio. Variações nas suas dimensões têm influência em propriedades importantes como a dureza, a tenacidade ou a resistência à abrasão. Para aplicações onde a tenacidade e a ductilidade são parâmetros fundamentais, o tamanho de grão deverá ser mais grosseiro, ao contrário do que acontece em aplicações que exigem dureza e resistência à abrasão, onde o tamanho de grão é mais fino, apresentando no entanto um comportamento mais frágil. Estudos demonstram que o módulo de Young é largamente dependente do tamanho de grão, ao contrário da resistência à compressão que diminui com o aumento do tamanho de grão até aos $20\mu\text{m}$. No entanto, apesar do módulo de

Young e a resistência à compressão diminuírem com o aumento do conteúdo de cobalto, foi verificado que para tamanhos de grão de 20µm a ductilidade mantém-se constante com a variação do teor em cobalto. Ou seja, o módulo de Young é determinado pela relação de massas de WC e Co até aos 20µm, mas para tamanhos de grão superiores é controlado por outros factores [7].

Normalmente são utilizados dois métodos para determinar o tamanho de grão em carbonetos cementados. O método planimétrico de Jeffries [8], consiste em contar o número de grãos presentes numa área conhecida. O número de grãos por milímetro quadrado, N_A , é determinado pela seguinte formula :

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right) \quad (2.1-1)$$

onde f é o multiplicador de Jeffries (dado tabelado), N_{inside} é o número de grãos que estão completamente dentro do círculo delimitador da área de teste e $N_{intercept}$ o número de grãos que são interceptados pelo círculo. A área média de grão é dada por $\frac{1}{N_A}$.

Uma outra forma para a obtenção do tamanho de grão é recorrendo aos métodos de intercepção. Dos vários procedimentos a adoptar, um deles é o método circular de Abrams [8]. É seleccionado um campo de observação aleatoriamente e são representados nele três círculos concêntricos, de forma a perfazer um comprimento total linear de 500mm. Para cada campo de observação são contados os grãos que são interceptados pelos três círculos, devendo ser analisados no mínimo cinco campos diferentes. Para cada campo de observação é calculado o N_L (número de intercepções por unidade de comprimento da linha de teste) ou o P_L (número de superfícies de grão interceptadas pela linha de teste), sendo:

$$\overline{N_L} = \frac{N_I}{L/M} \quad (2.1-2)$$

$$\overline{P_L} = \frac{P_I}{L/M} \quad (2.1-3)$$

onde N_I e P_I são o número de intercepções pelos círculos para cada campo, L é o comprimento da linha de teste (500mm) e M é a ampliação.

O próximo passo é o cálculo do valor médio para as intersecções em cada campo, \bar{l} :

$$\bar{l} = \frac{1}{N_L} = \frac{1}{P_L}$$

(2.1-4)

Com os valores médios de N_L , P_L ou \bar{l} , recorrendo aos ábacos da norma [8] e após calcular o valor para o tamanho de grão ASTM G, obtém-se o valor para o tamanho de grão.

Outro método de intercepção, é o método linear de Heyn [8], que consiste na determinação do número de grãos que são interceptados por um segmento de recta. O comprimento do segmento de recta deve ser tal que sejam possíveis contar pelo menos 50 intercepções, sendo:

$$\bar{L} = \frac{1}{N_L} = \frac{L_T}{P \cdot M}$$

(2.1-5)

com N_L a representar o número de intercepções pelo comprimento total da linha de teste, L_T , P o número total de superfícies de grão interceptadas e M a ampliação. O passos seguintes são semelhantes aos aplicados no método anterior, recorrendo aos ábacos e determinando o valor para o tamanho de grão ASTM G.

Inicialmente o método preferido era o método planimétrico de Jeffries. No entanto, numa situação de produção era mais difícil de aplicar do que os métodos de intercepção, pois é necessária a marcação dos grãos à medida que a contagem avança, para minimizar eventuais erros na contagem. Nos métodos de intercepção este procedimento não é necessário. O método de Abrams tornou-se, assim, a técnica de análise preferida. O método de intercepção dos três círculos concêntricos permite uma estimativa do tamanho de grão de forma mais precisa e em menos tempo, comparativamente ao método planimétrico.

2.1.3.2 Contiguidade

A formação de um esqueleto contínuo pelos grãos de carboneto de tungsténio é ainda um ponto discutível. Autores como Warren e Waldron [9] sugerem que na grande maioria dos metais duros a fase de carboneto existe na forma de esqueleto contínuo, durante e após a sinterização. No entanto, e apesar de existirem opiniões que suportam a ideia de que os grãos estão separados entre eles por uma fina camada de cobalto, uma teoria assente num esqueleto modificado é aceite. A contiguidade é então a medida do grau de contacto entre os grãos de carboneto e pode ser expressa por:

$$C_{\alpha} = \frac{2(N_L)_{\alpha\alpha}}{2(N_L)_{\alpha\alpha} + (N_L)_{\alpha\beta}} \quad (2.1-6)$$

onde $(N_L)_{\alpha\alpha}$ é o número médio de intercepções, por unidade de comprimento das linhas de teste, das interfaces carboneto-carboneto e $(N_L)_{\alpha\beta}$ o número de intercepções das interfaces carboneto-cobalto.

A contiguidade varia com o conteúdo de cobalto, o tempo de sinterização e em menor escala com a temperatura, e o seu estudo é importante pelo efeito que tem na propriedades mecânicas do carboneto [5].

2.1.3.3 Distância média do ligante

Quando está em discussão o desgaste do carboneto de tungsténio, a distância média do ligante é um parâmetro importante, na medida que está directamente ligada ao desenvolvimento dos vários mecanismos de desgaste. A distância média do ligante é a medida da espessura da camada de cobalto. É definida como a média aritmética da distância compreendida entre a interface de uma partícula de carboneto com o agente aglutinante até outra partícula, medida no aglutinante (ligante). Esta camada é dependente do conteúdo de aglutinante (cobalto, por exemplo) e do tamanho de grão, sendo calculada pela seguinte equação [5]:

$$d_{Co} = \frac{1}{1+C} d_{WC} \frac{V_{Co}}{V_{WC}} \quad (2.1-7)$$

onde d_{Co} representa a distância média do ligante, d_{WC} o tamanho de grão, C a contiguidade, V_{WC} e V_{Co} a fracção volúmica de carboneto e a fracção volúmica de cobalto, respectivamente.

A distância média do ligante pode ser expressa de forma mais simplificada pela expressão [10]:

$$d_{Co} = \frac{d_{WC} V_{Co}}{1 - V_{Co}}$$

(2.1-8)

O conteúdo de carbono e a mistura (moagem) têm uma importante influência na distribuição da fase aglutinante. Durante o aquecimento até à temperatura de sinterização o carbono controla a redistribuição do cobalto. Por outro lado, uma mistura insuficiente durante a moagem pode originar bolsas de cobalto de dimensão considerável e vão influenciar a distribuição equilibrada do cobalto.

2.1.3.4 Fracção volúmica

O contraste entre o carboneto de tungsténio e o cobalto permite um detecção eficaz das superfícies correspondentes a cada fase com recurso a microscopia electrónica de varrimento, sendo que a presença de carbonetos cúbicos determina a necessidade da ausência de ruídos na imagem. O conhecimento das fracções volúmicas dos constituintes do carboneto cementado reveste-se de importância, pelo facto de o seu conhecimento explicar o comportamento de um determinado carboneto cementado em função de uma percentagem maior ou menor de aglutinante, ou até da presença de carbonetos cúbicos.

2.1.4 Propriedades mecânicas

A utilização dos carbonetos cementados está directamente ligada à sua resistência ao desgaste. Os carbonetos de tungsténio têm uma excelente resistência à abrasão, sendo amplamente utilizados em operações de maquinagem onde a apara produzida é descontínua, ou onde as aparas possam provocar desgaste de cratera em ferramentas de aço rápido. Aliado à resistência ao desgaste, o carboneto de tungsténio apresenta também um bom compromisso entre a dureza e a tenacidade. O tamanho de grão e a percentagem de cobalto são os factores com influência mais vincada nas propriedades do carboneto.

2.1.4.1 Dureza

A dureza determina a resistência à abrasão e ao desgaste do carboneto. É afectada não só pela composição química do carboneto (% de cobalto), mas também pelo nível de porosidade e pela microestrutura (tamanho de grão). Para carbonetos de tungsténio com tamanho de grão semelhante, a dureza e a resistência à abrasão decrescem com o aumento do conteúdo de cobalto (fig. 2.1-6). Por outro lado, para uma determinada percentagem de cobalto, a dureza aumenta com a diminuição do tamanho de grão. Os valores de dureza para carbonetos cementados usados em operações de maquinagem estão entre os 1100 e os 2000 HV.

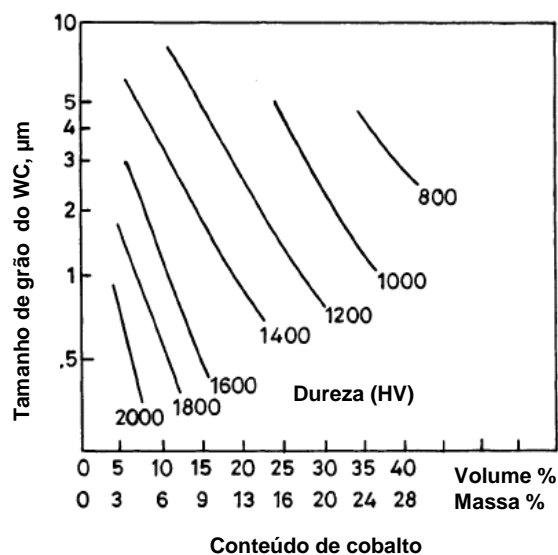


Figura 2.1-6 Dureza à temperatura ambiente em função do tamanho de grão e do conteúdo de cobalto [5]

No entanto, o verdadeiro indicador da resistência à deformação plástica em operações de corte deve ser obtido através da determinação da dureza a temperaturas elevadas (fig. 2.1-7), constatando-se neste caso que esta diminui com o aumento da temperatura [3].

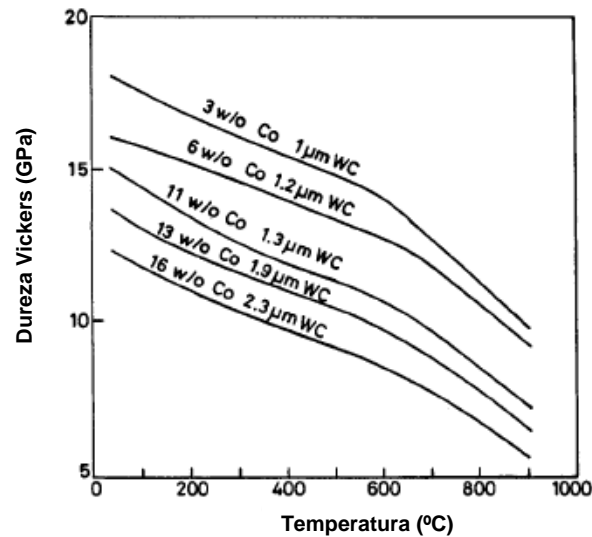


Figura 2.1-7 Variação da dureza (HV^1 , carga: 9.81 N) a temperaturas elevadas com diferentes percentagens de cobalto [5]

A dureza a quente não é significativamente influenciada pelas partículas de carboneto, pois a dureza destas não sofre alterações importantes com o aumento da temperatura (fig. 2.1-8). A diminuição da dureza está directamente relacionada com a perda de rigidez do cobalto à medida que a temperatura vai aumentando, até que o calor absorvido é suficiente para o cobalto adquirir características de deformação plástica [4].

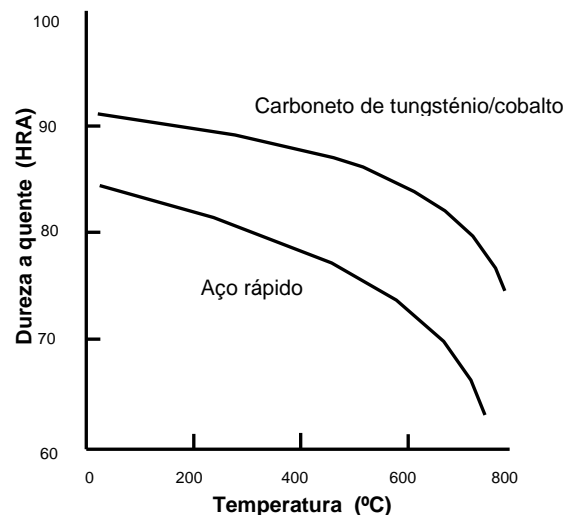


Figura 2.1-8 Valores típicos da dureza a quente para aglomerados de carboneto de tungsténio e ferramentas de aço rápido [4]

¹ $HV \rightarrow MPa$ multiplicar por 9.807; $HV \rightarrow GPa$ multiplicar por 0.009807. Tabela de equivalência de escalas em anexo.

A adição de TaC/NbC e TiC melhora a resistência do carboneto à deformação plástica e a taxa de decréscimo da resistência do mesmo com o aumento da temperatura. Estas características aumentam a resistência à deformação da aresta de corte. O facto destes aditivos apenas existirem como carbonetos cúbicos, e não como monocarbonetos, faz com que possuam uma elevada dureza. Contribuem, por isso, de modo significativo na dureza a quente dos carbonetos cementados. As superfícies de grão, ao contrário do que acontece no carboneto de tungsténio não são molhadas pelo agente aglutinante (cobalto), possibilitando que as deformações a altas temperaturas sejam retardadas [5]. A adição de Cr_3C_2 como inibidor de crescimento de grão também tem influencia positiva na dureza a quente do carboneto [11]. Ao utilizar o níquel como agente aglutinador na substituição do cobalto, a dureza pode ser afectada negativamente se o conteúdo do níquel ultrapassar os 6% [12]. A substituição do cobalto pelo ferro ou por uma solução de Fe/Ni pode originar um aumento da dureza do carboneto, mediante a aplicação de tratamentos subsequentes. Por exemplo, um tratamento a baixa temperatura aumenta a dureza de WC-Ni/Fe [13, 14]. Existem estudos que sugerem que a introdução de tungsténio na fase aglutinante melhora substancialmente a dureza a quente dos carbonetos cementados de grão ultrafino [15].

2.1.4.2 Tensão de ruptura transversal

A tensão de ruptura transversal (TRT) é uma combinação de tensão de corte, tensão de compressão e tensão de ruptura e é usada como uma medida de tenacidade dos carbonetos cementados. Face à sua elevada dureza, o carboneto de tungsténio não se comporta de forma aceitável quando sujeito a um ensaio de tracção uniaxial. Desta forma, a tensão de ruptura transversal é determinada recorrendo ao ensaio de dobragem em três pontos.

Os carbonetos cementados têm uma resistência elevada, não podendo ser comprovada na prática devido à presença de defeitos na estrutura ou na superfície, que são locais onde a concentração de tensões sobe quando é aplicada uma tensão. A concentração de tensões não pode ser aliviada por deformação plástica, sendo atingida a tensão de ruptura nas zonas de concentração de tensões quando o nível de tensões aplicado é bastante inferior. A tensão de ruptura de um componente frágil é portanto, dependente da natureza e da distribuição dos defeitos. Nos carbonetos cementados a tensão de ruptura é geralmente a tensão aplicada para originar a fractura num ponto de concentração de tensões ou na superfície tensionada da amostra. Os defeitos possíveis podem ser vazios, inclusões, grãos excessivamente grandes, áreas segregadas ou zonas com excesso de agente aglutinador.

O conteúdo de cobalto, além de ser a variável mais importante na obtenção de carbonetos cementados de diferentes qualidades, tem uma influência importante na tensão de ruptura transversal. A tensão de ruptura transversal é melhorada com o aumento da percentagem de cobalto até cerca dos 20%, tal como se pode observar na figura 2.1-9, [16].

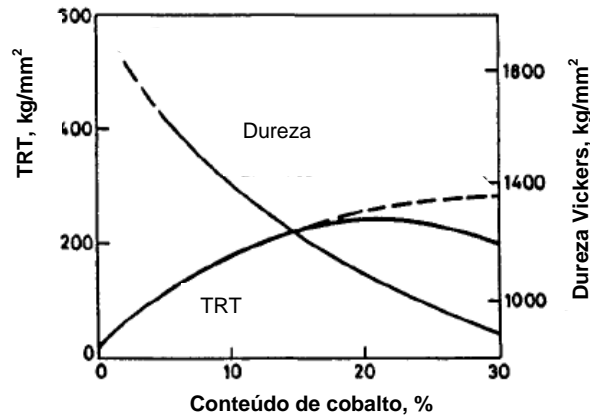


Figura 2.1-9 Efeito do cobalto na dureza (HV) e na TRT (tamanho de grão: 2 μ m) [5]

No que se refere à tensão máxima admissível, esta é fortemente dependente do tamanho de grão. A presença pontual, em carbonetos cementados de grão fino, de grãos mais grosseiros origina um decréscimo da tensão de ruptura transversal. Os valores máximos da tensão de ruptura transversal são obtidos para um tamanho de grão médio (4 μ m), tal como indica a figura 2.1-10.

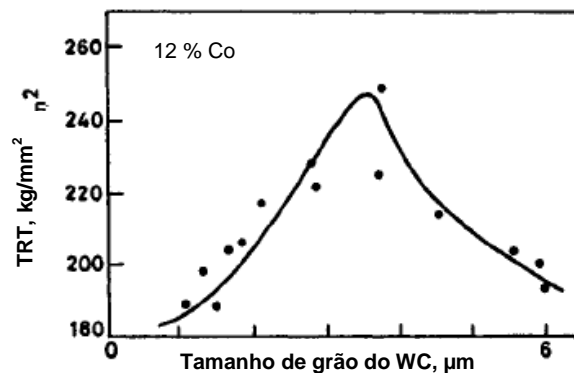


Figura 2.1-10 Efeito do tamanho de grão na tensão de ruptura transversal (12%Co) [5]

O carbonetos WC-Co exibem uma tensão de ruptura transversal e uma tenacidade superiores se o cobalto apresentar mais fase α -Co, uma fase mais dúctil.

O carboneto de titânio é reconhecido por reduzir a resistência à aderência em situações de desgaste com transferência de material, no entanto tem um efeito adverso na tensão de ruptura transversal à temperatura ambiente. Por outro lado, o carboneto de tântalo ou nióbio têm um resultado oposto, melhorando a tensão de ruptura transversal à temperatura ambiente. A temperaturas elevadas o inibidor de grão Cr_3C_2 , tem influência positiva na carga de ruptura transversal, o que já não acontece quando é aumentado o conteúdo dos carbonetos cúbicos (TiC/TaC) no carboneto cementado.

A adição de tungstênio à fase aglutinadora aumenta a resistência a temperaturas elevadas, fruto da inibição que provoca da transformação da fase $\alpha\text{-Co}$ em fase $\varepsilon\text{-Co}$, o que resulta em carbonetos com alta resistência a temperaturas elevadas.

A utilização do níquel como aglutinador diminui em cerca de 20% a tensão de ruptura transversal, sendo que se este for utilizado juntamente com o ferro tem um efeito precisamente contrário [5, 16].

2.1.4.3 Tenacidade

Normalmente denominada por tenacidade à fractura, é uma medida de resistência do material à propagação de fissuras. A elevada dureza dos carbonetos cementados é favorável ao desenvolvimento de fractura frágil. O desgaste deste material ocorre muitas vezes por fractura, sendo por isso importante determinar a tenacidade, que em muitos casos controla o mecanismo de desgaste.

A tenacidade de um carboneto cementado melhora com o conteúdo de cobalto e com o tamanho de grão. Estudos sobre a tenacidade a temperaturas elevadas revelaram que até aos 600°C não há grandes alterações de comportamento. No caso de se introduzir TiC e (Ta/Nb)C, a temperatura à qual a tenacidade sofre alterações é superior.

Deficiências nos níveis de carbono, suficientes para produzir a fase “ η ”, reduzem a tenacidade. O carbono em excesso, que proporciona o aparecimento de grafite livre, também prejudica a tenacidade, mas em menor escala.

Os carbonetos cementados que utilizam como agente aglutinador o cobalto apresentam uma tenacidade superior comparativamente aos que utilizam o ferro ou o níquel. Existem, no entanto,

estudos que demonstram que a aplicação do ferro combinado com o níquel como agente aglutinador proporciona valores de tenacidade superiores aos registados pelos carbonetos cementados com cobalto, como referido relativamente à tensão de ruptura transversal [5].

Um forma simples de determinar a tenacidade na técnica que foi proposta por Palmqvist em 1962, e que consiste na execução de uma indentação Vickers numa amostra e medir comprimento das fissuras que se formam nos quarto cantos. Sabendo o valor da carga aplicada, a tenacidade pode ser determinada por:

$$K_{lc} = 0.0889 \sqrt{\frac{HV \times F}{L_i}} \quad (2.1-9)$$

com a soma do comprimento de todas as fissuras com origem nos cantos a ser dada por:

$$L_i = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad (2.1-10)$$

Com HV a representar a dureza Vickers em N/m^2 e F a carga de indentação em Newton. Na equação seguinte é expressa a dureza Vickers HV em N/m^2 , sendo d a média das 2 diagonais da indentação (m):

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.1-11)$$

Quando não são reveladas quaisquer fissuras, uma técnica também válida é a determinação da tensão de ruptura transversal através de um ensaio de dobragem em três pontos. Este método pode ser realizado com ou sem fissuração prévia, sendo que no entanto a fissuração prévia introduz outras complicações no teste, já que normalmente a falha do carboneto ocorre logo após o início da fissuração. A determinação da tenacidade por este método é mais complexa [17].

As tabelas 2.1-3 e 2.1-4, mostram o efeito de alguns parâmetros e carbonetos em determinadas propriedades dos carbonetos de tungsténio.

Tabela 2.1-3 Relação entre as principais propriedades, tamanho de grão e % cobalto

O aumento de:	Leva a:				
	% Cobalto	Resistência à abrasão	Tamanho de grão	Dureza	Tenacidade
% Cobalto		Diminui		Diminui	Aumenta
Resistência à abrasão	Diminui		Diminui	Aumenta	Diminui
Tamanho de grão		Diminui		Diminui	Aumenta
Dureza	Diminui	Aumenta	Diminui		Diminui
Tenacidade	Aumenta	Diminui	Aumenta	Diminui	

Tabela 2.1-4 Efeito dos carbonetos de titânio e de tântalo sobre características do metal duro [18]

Composição		Efeito sobre			
Componente	Quantidade Relativa	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Resistência ao desgaste de cratera	Resistência mecânica
TaC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente
	Grande	Diminui Ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui Ligeiramente
TiC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui Ligeiramente
	Grande	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui Ligeiramente

2.1.5 Classificação dos carbonetos cementados

A norma ISO (*Internacional Organization for Standardization*) classifica os carbonetos cementados em tipo K(ferros fundidos), P(Aços), M(Aço inoxidável) e mais recentemente N(alumínios), S(superligas) e H(aços tratados). Embora esteja de certa forma relacionada com a composição do carboneto, na verdade a classificação é feita de acordo com o desempenho e não com a composição. Para cada um dos tipos referidos atrás existe uma cor que lhes está associada. Por exemplo: Tipo K-vermelho; Tipo P-azul; Tipo M-amarelo, etc..

As ferramentas em carbonetos cementados básicos (WC-Co) são adequadas para materiais não ferrosos, não metálicos e para o ferro fundido, onde na maioria dos casos as temperaturas que são atingidas no processo de maquinagem não são suficientemente elevadas para provocar a dissolução do carboneto de tungstênio na peça. Estas ferramentas são denominadas do tipo K.

Para a maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas longas e dúcteis, as ferramentas aplicadas são baseadas em carbonetos de tungsténio altamente ligados (WC-TiC-TaC-Co), sendo designadas por tipo P. A classificação tipo M é um compromisso entre o tipo K e o tipo P, sendo utilizada em trabalhos com metais e ligas ferrosas que apresentam aparas fragmentadas e materiais não ferrosos. Na tabela 2.1-5 estão descritas as propriedades físicas e a composição química dos carbonetos de tungsténio segundo a norma ISO, para os grupos P, M e K.

Tabela 2.1-5 Composição químicas e propriedades físicas dos carbonetos cementados segundo a Norma ISO [19]

Designação	Composição química aproximada (%)			Características físicas (mecânicas)				
	WC	TiC+TaC	Co	Massa vol. (g/m ³)	Dureza Vickers (HV)	Tensão de Ruptura Transversal (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Coef. dilatação térmica (10 ⁻⁶ /K)
P01	30	64	6	7.2	1500	750	-	-
P10	55	36	9	10.4	1600	1400	5.2	6.5
P20	76	14	10	11.9	1500	1500	5.4	6.0
P25	73	19	8	12.5	1500	1700	5.5	6.0
P30	82	8	10	13.0	1450	1700	5.6	5.5
P40	77	12	11	13.1	1400	1800	5.6	5.5
P50	70	14	16	12.9	1300	2000	5.2	5.5
M10	84	10	6	13.1	1650	1400	5.8	5.5
M20	82	10	8	13.4	1550	1600	5.6	5.5
M30	81	10	9	14.4	1450	1800	5.8	5.5
M40	78	7	15	13.5	1300	2000	5.5	5.5
K01	93	2	5	15.0	1750	1200	6.3	5.0
K05	92	2	6	14.6	1700	1350	6.3	5.0
K10	92	2	6	14.8	1650	1500	6.3	5.0
K20	91.5	2.5	6	14.8	1550	1700	6.2	5.0
K30	89	2	9	14.5	1450	1900	-	5.5
K40	88	-	12	14.3	1300	2100	5.8	5.5

Os vários graus reflectem a optimização efectuada na ferramenta. Isto é, se a dureza foi privilegiada e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste, ou se o factor favorecido foi a tenacidade. A resistência ao desgaste é mais importante do que a tenacidade para cortes com valores para o avanço baixos e para operações de acabamento. Por outro lado, a tenacidade é mais relevante para avanços mais elevados, desbaste e operações de corte interrompidas. Os graus variam desde 1 a 50 para o tipo P, de 10 a 40 para os tipo M e de 1 a 40 para o tipo K, com as propriedades a evoluírem do mais duro para o mais tenaz [2, 5, 19].

Na escolha do carboneto cementado mais adequado para trabalhar madeira é importante ter em consideração que apesar das forças de corte serem mais baixas, quando comparadas com a grande generalidade das aplicações, as ferramentas estão sujeitas a forças de impacto significativas, resultantes da estrutura heterogénea da madeira. A tenacidade é por isso uma propriedade que não pode ser ignorada na selecção da ferramenta, não só devido a estas forças de impacto, mas também devido às forças centrífugas geradas durante a maquinagem a velocidades elevadas. De salientar, que a presença de matéria inorgânica na constituição dos produtos derivados da madeira provoca um desgaste abrasivo acentuado. Adicionalmente, a necessidade de um bom acabamento superficial, exigido em muitas situações, implica uma aresta de corte afiada. Os carbonetos cementados de grão fino constituem um compromisso e portanto uma opção válida para este tipo de aplicação. Os graus com tamanho de grão fino e baixo conteúdo de cobalto são utilizados no trabalho de derivados da madeira, como sejam por exemplo, os aglomerados de partículas e aglomerados de fibras. A combinação de carbonetos com tamanho de grão fino, baixo teor em cobalto e um controlo apertado dos parâmetros de produção dos carbonetos cementados por forma a evitar o crescimento de grão durante o processo, permitem obter carbonetos cementados com durezas na ordem dos 2000 HV10, que comparativamente com os graus normais (tamanho de grão 4 μ m) apresentam uma melhoria na resistência ao desgaste de cerca 30%. A tabela 2.1-6 apresenta o campo de aplicação dos carbonetos cementados do tipo P, K e M.

No trabalho de madeira no seu estado natural, em situações mais complicadas, as ferramentas baseadas em *stellite* e aço rápido foram substituídas por carbonetos cementados com 10% de cobalto, melhorando de forma significativa o tempo de vida da ferramenta [20].

Tabela 2.1-6 Campo de aplicação dos carbonetos cementados (P, M, K) de acordo com a utilização segundo a Norma ISO [19]

Designação	Campos de aplicação
Grupo P	Materiais ferrosos de apara longa (aços e ferro fundido maleável)
P01	Operações de acabamento fino, avanço reduzido e elevada velocidade de corte (torneamento e furacão de precisão). Exige máquinas rígidas e isentas de vibrações. Idem – para aplicações em que ocorre um elevado aquecimento da ferramenta de corte. Operações de desbaste ligeiro, com velocidades de corte médias a elevadas e avanço médio. Operações de desbaste com velocidades de corte e avanços médios. Operações com baixas e médias velocidades de corte e secções de apara médias a elevadas (torneamento, fresagem e aplainamento). Operações de desbaste pesado e em condições severas de corte, (corte interrompido) em máquinas sujeitas a vibrações. Velocidades baixas a médias e elevados avanços e profundidades de corte (torneamento e aplainamento). Idem - elevada tenacidade, aplicações em que se utilizam máquinas obsoletas, onde substituí o aço rápido com vantagem.
P10	
P20	
P25	
P30	
P40	
P50	
Grupo M	Classes universais (aços inoxidáveis, ferro fundido, ferro fundido nodular e maleável)
M10	Operações de torneamento com velocidades de corte médias a elevadas e secções de corte médias. Operações de torneamento, fresagem e aplainamento, com velocidades de corte médias e secções de apara médias. Idem – com secções de apara médias a elevadas. Torneamento, sobretudo em máquinas automáticas.
M20	
M30	
M40	
Grupo K	Materiais de apara curta (ferro fundido, aço temperado, não-ferrosos, plásticos, madeiras)
K01	Operações de acabamento fino e de precisão, com corte ligeiro, avanço reduzido e velocidade de corte elevada. Operações de acabamento, em torneamento e furacão de precisão, com elevada velocidade de corte. Operações de maquinagem gerais. Idem – com avanços e velocidades de corte médias. Operações de desbaste, corte interrompido e profundo. Idem – em condições muito desfavoráveis.
K02	
K10	
K20	
K30	
K40	

2.1.6 Desgaste no trabalho de madeira e seus derivados

Desde a sua introdução na indústria da madeira (década de 50), os carbonetos cementados possibilitaram um aumento no tempo útil da ferramenta, fundamentalmente devido à sua elevada dureza, quando comparada com o aço carbono, os aços rápidos ou ligas de cobalto (*stellite*). Mesmo atendendo à grande dispersão deste tipo de ferramentas, há ainda alguma carência na informação relativa aos mecanismos de desgaste, especialmente no trabalho de derivados de madeira. Este aumento de vida útil foi particularmente significativo na maquinagem de materiais abrasivos, como as espécies de madeira tropicais que contêm sílica e os produtos derivados da madeira, que resultam da reconstituição desta (aglomerados de partículas, aglomerados de fibra

de madeira, p.ex.). Os carbonetos cementados são usados no trabalho da madeira como material base para fresas integrais ou pastilhas de corte a serem incorporadas em fresas ou serras circulares.

O processo de desgaste de uma ferramenta aplicada no trabalho da madeira e seus derivados é constituído por vários mecanismos de desgaste. Dentro destes mecanismos que actuam em simultâneo e contribuem para a deterioração da ferramenta há a considerar: o arrancamento, a abrasão, a erosão, a microfissuração, a corrosão química e electroquímica e a oxidação.

O arrancamento dá origem a uma ruptura catastrófica da aresta de corte, enquanto os outros mecanismos actuam de uma forma progressiva. A abrasão, a erosão e a microfissuração envolvem a remoção de partículas de desgaste microscópicas. A corrosão e oxidação originam a transformação química do material cortante, de tal maneira que este pode ser facilmente subtraído por abrasão. Dependendo das condições do corte (velocidade de corte, avanço, espessura da aplainadora) e das condições do material a trabalhar (composição e humidade), alguns destes mecanismos terão um papel mais dominante na taxa de desgaste.

Na madeira em estado verde, o desgaste produzido pela corrosão química e electroquímica, resulta da dissolução do cobalto por ataque químico dos agentes extractivos presentes, e que consequentemente conduz à remoção dos grãos de carboneto de tungsténio. A adição de níquel e cromo ao cobalto, por diminuição do conteúdo deste e a diminuição do tamanho de grão, melhora a resistência do carboneto a este tipo de ataque. A componente corrosiva representa cerca de 40-60% do desgaste total é proporcional ao aumento do conteúdo de cobalto e do tamanho de grão [21].

Na maquinagem de produtos derivados da madeira, tais como os aglomerados de partículas e os aglomerados de fibras, o comportamento ao desgaste é diferente do verificado na madeira verde. Na generalidade, os produtos reconstituídos da madeira são mais duros, mais abrasivos e mais secos do que a madeira no estado sólido. As operações de corte, na maioria dos casos são por arrancamento e a aplainadora resultante raramente é contínua. Fundamentalmente, o desgaste nos carbonetos cementados (WC-Co) é causado pela remoção do agente aglutinador (Co). A aderência dos grãos de WC à matriz fica bastante afectada, sendo estes removidos subsequentemente por via mecânica.

As propriedades a alta-temperatura (dureza, tenacidade) e a estabilidade química dos carbonetos de tungsténio são de extrema importância. As temperaturas de corte são mais elevadas do que as

verificadas no trabalho da madeira sólida e a decomposição dos elementos constituintes do derivado afectam de forma adversa a ferramenta. Durante a maquinagem de aglomerados de partículas e aglomerados de fibras, a ferramenta está exposta a gases e vapores reactivos gerados pela decomposição térmica das fibras e outros aditivos. Enxofre, cálcio, cloro ou carbono podem ser encontrados na aresta de corte desgastada, resultado da decomposição térmica.

O movimento relativo entre a peça e a ferramenta facilita a remoção do cobalto da aresta de corte, possibilitando a exposição contínua de superfície “limpa” e que acelera o processo de oxidação, que com as temperaturas que são geradas vê criadas as condições para se desenvolver.

Na fase inicial e mais crítica do desgaste, a fase aglutinadora é parcialmente removida dos interstícios entre os grãos de WC por deformação plástica e microabrasão. Não raras vezes, os aglomerados contêm partículas de areia, que ao actuarem na interface de corte vão penetrar entre os grãos de carboneto e remover o agente aglutinador por microabrasão. Após a remoção de quantidade de cobalto suficiente para permitir o arrancamento dos grãos de WC, estes são removidos mecanicamente. A oscilação posicional dos grãos de WC na matriz, como resultado das elevadas forças de flutuação que são geradas durante a maquinagem dos aglomerados, originadas pela estrutura heterogénea destes (partículas de madeira, fibras de madeira, resina endurecida), vai proporcionar a extrusão parcial do agente aglutinador, sendo este removido posteriormente por deformação plástica e microabrasão. O movimento relativo entre os grãos vai também desenvolver fissuração seguida de fragmentação e eventual remoção destes.

Nos aglomerados de partículas, uma introdução de vanádio e o aumento da dureza melhora o comportamento ao desgaste da ferramenta, ou contrário da introdução de níquel e crómio onde alguns estudos sugerem que a resistência ao desgaste é afectada, contrariamente ao descrito em literatura existente. Esta diminuição da resistência pode estar ligada ao facto de que embora estes elementos introduzam um acréscimo de dureza e de resistência à corrosão no cobalto, a diminuição de ductilidade pode originar a ruptura frágil da ferramenta.

De referir, que há painéis de derivados de madeira (aglomerados de partículas, OSB, MDF) que são fabricados com recurso a matérias recicladas (madeira reciclada, aparas de madeira, etc.). No entanto, como resultado de um controlo pouco apertado, ou muito difícil de realizar no que refere à inclusão destes materiais reciclados como constituintes do aglomerado, verifica-se frequentemente a presença de elementos metálicos, plásticos ou pedras no aglomerado. Estes elementos em contacto com a ferramenta de corte promovem um desgaste acentuado instantâneo, que determinam na maioria dos casos o fim da vida útil da ferramenta.

2.2 Madeira

A madeira é um importante recurso natural com características únicas, que aliadas à sua abundância na natureza fizeram com que fosse um material largamente utilizado como matéria-prima nas mais diversas aplicações (estruturas, mobiliário, veículos, etc.). Comparativamente a outras matérias-primas, a madeira exige um número de recursos substancialmente menor até se atingir o produto final. A madeira é um dos poucos recursos naturais que é renovável. No entanto, em aplicações estruturais o aparecimento do aço, com perfis de formas e dimensões variadas, veio esmorecer a utilização da madeira em estruturas. Nos últimos anos, por forma a recuperar a preponderância da madeira foram abandonados os sistemas construtivos clássicos, com a aplicação de peças com secção composta: estruturas laminadas, contraplacados e aglomerados.

Em comparação com outros materiais e apesar dos diversos estudos e investigações desenvolvidos, a madeira continua a revelar-se um material complexo. O desconhecimento e a incerteza ligada à variação das suas propriedades com o tempo está na origem de restrições na sua utilização. É fundamental perceber quais os parâmetros que são comuns aos diversos tipos de madeira, assim como quais as características que variam de madeira para madeira. Dentro dos pontos comuns aos vários tipos de madeira deve referir-se que:

- Os troncos possuem uma estrutura vertical e simetria radial;
- A madeira apresenta uma estrutura celular;
- Toda a madeira é higroscópica;
- Toda a madeira é anisotrópica;
- A composição química das paredes celulares é semelhante: celulose, hemicelulose e lenhina;
- Toda a madeira é susceptível de ser atacada por fungos ou insectos;
- Toda a madeira é inflamável, particularmente quando seca.

Relativamente às características que variam de madeira para madeira, estas são:

- Textura, brilho, gosto, cheiro;
- Propriedades físicas: densidade, dureza, grau de variação dimensional, resistência mecânica, permeabilidade, etc.;

-Propriedades químicas: características de adesão, reacção com substâncias químicas.

A madeira é normalmente classificada com base na sua origem, ou seja, se esta provem de uma árvore de madeira macia (*coníferas*) ou de madeira dura (*folhosas*). Esta divisão não está relacionada com a dureza ou com a densidade da madeira. A classificação é fundamentada na espécie botânica da árvore [22].

2.2.1 Painéis de derivados de madeira

Como referido anteriormente, os painéis de derivados de madeira assumiram nos tempos recentes um papel importante como matéria-prima para as mais diversas aplicações. A possibilidade de utilizar materiais com características de acordo com a aplicação, sejam eles mais leves, mais resistentes ou funcionando apenas como solução decorativa, veio determinar a importância dos derivados de madeira no mercado. A versatilidade dos painéis de derivados de madeira e a sua continua expansão está relacionada com propriedades que lhes conferem esta grande aceitação no mercado.

- Boa relação peso/resistência;
- Boa relação custo/resistência;
- Facilidade de trabalho e manejo;
- Alargada gama de dimensões;
- Favoráveis ao ambiente (matérias-primas recicláveis; são passíveis de ser reciclados).

Os painéis de derivados de madeira são compostos pelo lenho (madeira), um ligante (normalmente uma resina sintética) e aditivos (produtos hidrófugos, ignífugos e preservadores). As composições e a estrutura diferem entre os vários tipos de aglomerados, sendo uma divisão possível de acordo com o grau de desagregação do tronco:

Serragem: Painéis de madeira maciça;

Desenrolamento: LVL, contraplacado;

Destroçamento grosseiro: OSB;

Destroçamento fino: Aglomerados de partículas de madeira, aglomerados de madeira-cimento;

Desfibramento: Aglomerados de fibras.

Relativamente à madeira maciça, a introdução dos painéis de derivados de madeira expandiu a possibilidade de escolha. Os derivados de madeira apresentam propriedades bastantes diversas entre eles, o que permite cobrir uma vasta gama de aplicações tendo em conta o tipo de aplicação em causa e o ambiente de exposição.

Na escolha do tipo de aglomerado a variação da massa volúmica entre os diversos tipos deve ser considerada, resultado da sua influência nas propriedades físicas do painel. A figura 2.2-1 mostra a variação da massa volúmica entre diferentes tipos de aglomerado.

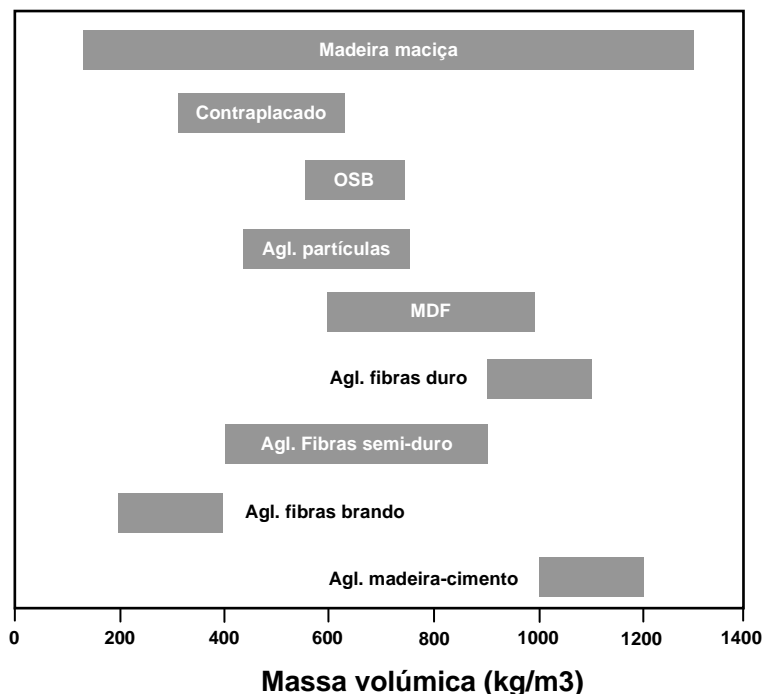


Figura 2.2-1 Gama de variação da massa volúmica entre aglomerados (LNEC)

O teor de água nos painéis deve ser considerado, pois tal como na madeira, variações no teor de água produzem alterações nas respectivas propriedades mecânicas. Se as variações forem significativas, podem ocorrer fenómenos de degradação tais como o inchamento, a delaminação e podridão. Relacionado com os valores das alterações do teor de água está a estabilidade dimensional. Grandes variações nas condições ambiente (temperatura e humidade relativa do ar),

conduzem a alterações no teor de água de maneira ao aglomerado atingir o equilíbrio com o ambiente a que está exposto. Este fenómeno pode levar a modificações dimensionais inaceitáveis.

A resina utilizada no aglomerado em causa tem influência directa na resistência à humidade. A durabilidade biológica e a resistência ao fogo são outras características preponderantes na selecção do tipo de aglomerado. No que se refere às propriedades mecânicas, para além do referido anteriormente, há que ter em consideração a caracterização do comportamento anisotrópico de alguns aglomerados [23]. A figura 2.2-2 apresenta diferentes tipos de painéis de derivados de madeira.



Figura 2.2-2 Painéis de derivados de madeira (LNEC)

De seguida é feita uma descrição dos tipos de painéis de derivados de madeira mais utilizados.

2.2.1.1 Painéis de madeira maciça

Os painéis de madeira maciça são constituídos por réguas de madeira coladas canto a canto e no caso de multicamada coladas face a face. Este tipo de painéis são classificados de acordo com a sua composição (unicamada ou multicamada), a suas condições de utilização (ambiente seco, húmido ou exterior), a sua aplicação (fins gerais ou fins estruturais), a composição da camada exterior (placas resinosas ou folhosas), a existência ou não de camadas topo a topo nas camadas exteriores e a condição superficial que apresentam (cruas, lixadas, texturadas e revestidas).

A estrutura dos painéis multicamadas é muito semelhante ao contraplacado, que no exemplo mais simples é composto por três camadas [23].

2.2.1.2 Contraplacado

Os painéis contraplacados resultam da colagem de várias folhas de madeira sobrepostas, dispostas entre si de maneira a que as respectivas fibras estejam orientadas perpendicularmente. Geralmente o número de folhas é ímpar, para garantir a simetria do contraplacado em relação ao plano médio da folha central ou da alma de madeira maciça.

Cada camada do contraplacado pode ser constituída por uma única folha de madeira ou por uma folha composta (várias folhas dispostas no mesmo plano). Após a disposição das várias camadas, efectua-se a operação de colagem sob pressão. A adesão é garantida por resinas termoendurecíveis, variando o tipo de resina consoante o ambiente a que o contraplacado estará exposto. Em aplicações com interiores secos e em alguns ambientes húmidos utilizam-se resinas de ureia-formaldeído (UF), sendo que em situações com interiores mais húmidos se aplicam resinas de melamina-ureia-formaldeído (MUF). Quando aplicados em ambiente exterior, usam-se resinas de fenol-formaldeído (PF).

Além do contraplacado “normal”, composto por várias folhas de madeira, se a alma for constituída por tiras de madeira maciça até 7mm de espessura e colocadas ao alto denomina-se contraplacado laminado. Se a alma for composta por tiras com largura entre 7mm e 30mm, posicionadas ao baixo, designa-se contraplacado lamelado.

Em comparação com uma placa de madeira maciça, o contraplacado apresenta uma maior resistência mecânica na direcção perpendicular às fibras da camada exterior. Exibe uma maior estabilidade dimensional, como resultado da restrição às alterações dimensionais na direcção perpendicular às fibras, que são introduzidas pela estabilidade ao longo das fibras adjacentes. De registar, que as alterações dimensionais devido às alterações do teor de água não são totalmente eliminadas, devendo ser considerado o movimento longitudinal. No final da produção o contraplacado tem um teor de água entre os 8 e os 10%. O efeito anisotrópico nas propriedades mecânicas do contraplacado também se faz sentir, sendo que comparativamente com a madeira maciça, é substancialmente menor.

Devido à sua estrutura de folhas cruzadas, o contraplacado é mais resistente à fissuração do que os restantes painéis derivados de madeira [23].

2.2.1.3 Painel microlamelado colado (LVL)

As placas microlameladas coladas têm uma estrutura semelhante a um contraplacado, diferindo apenas na disposição das fibras nas diversas camadas, que estão dispostas segundo a direção mais longa do elemento em causa. As folhas de madeira (usualmente com espessuras entre os 2,5 e os 5,0mm) que compõem o derivado de madeira são coladas por meio de resina resistente à humidade (fenol-formaldeído).

Tal como os contraplacados, os LVL apresentam propriedades mecânicas superiores às da madeira maciça. Durante o processo de fabrico é possibilitada a dispersão dos defeitos de fabrico ou mesmo a sua eliminação devido à escolha efectuada, que vem também permitir a incorporação das folhas de madeira de qualidade inferior no interior. Desta forma obtêm-se peças com uma estabilidade dimensional superior à madeira maciça. No que se refere a componentes para aplicações estruturais, o coeficiente de variação de resistência e rigidez varia entre os 10 e os 15%, comparativamente com os 20 a 45% da madeira maciça [23].

2.2.1.4 Painel de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB)

Os painéis OSB apresentam geralmente três camadas compostas por lascas de madeira, que estão alinhadas na direção paralela ao comprimento da placa nas camadas exteriores e de forma aleatória nas camadas intermédias.

Pelo facto de as partículas de madeira (lascas) que compõem a sua estrutura apresentarem uma dimensão superior às partículas que compõem as placas de partículas, as suas características vão ser superiores no que se refere à resistência e à rigidez. É possível, por isso, obter a mesma resistência com uma menor percentagem de resina. A distribuição das partículas de madeira nas três camadas, com orientações preferenciais nas camadas exteriores, contribui para o comportamento anisotrópico da placa. Tal como no contraplacado, é de esperar um diferença das propriedades mecânicas nas duas direções principais (comprimento e largura).

A resina fenol-formaldeído (PF) é a normalmente utilizada na produção de OSB (fig. 2.2-3), embora existam no mercado placas que são compostas por um sistema de colagem duplo, utilizando na camada central isocianato (PMDI) e melamina/ureia-formaldeído (MUF) nas camadas externas.

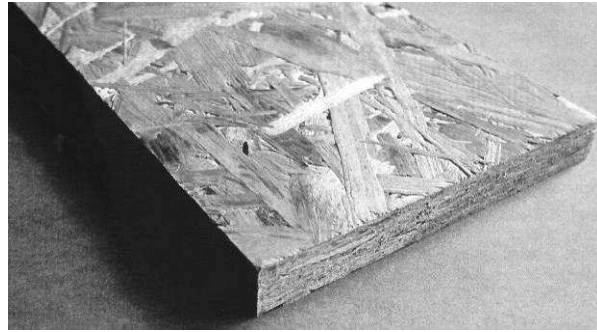


Figura 2.2-3 Placa de OSB (*LNEC*)

Devido ao tipo de partículas que as constituem, este tipo de placas não permite um acabamento superficial da mesma qualidade do obtido com os aglomerados de partículas ou de fibras, tendo como vantagem relativamente a estes dois tipos de placas a sua superior resistência mecânica [23].

2.2.1.5 Painéis de aglomerados de partículas de madeira

Os painéis de aglomerados de partículas (fig. 2.2-4) são constituídos por partículas de madeira, sendo a adesão garantida por resina sintética sujeita a aplicação de pressão e calor. Os painéis de aglomerados de partículas apresentam na sua constituição 83 a 88% (em massa) de partículas de madeira, 6 a 8% de resina, 5 a 7% de água e 1 a 2% de parafina. As resinas utilizadas neste tipo de painéis são a ureia-formaldeído (UF), em ambientes secos, ou melamina-ureia-formaldeído (MUF) para placas com maior resistência à humidade. É possível a introdução de aditivos na constituição do painel com o intuito de melhorar a sua estabilidade dimensional, a reacção ao fogo e a durabilidade face a agentes biológicos.

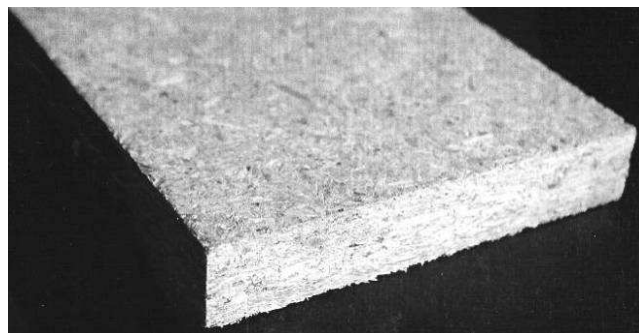


Figura 2.2-4 Placa de aglomerado de partículas (*LNEC*)

A estrutura da placa é caracterizada por três camadas. Nas faces são aplicadas partículas finas com um maior conteúdo de resina, aumentando a densidade, de maneira a obter uma superfície capaz de receber um tratamento superficial posterior, e o interior é constituído por partículas mais grosseiras. As partículas estão dispostas de forma aleatória.

As propriedades das placas de aglomerado de partículas de madeira são afectadas por vários factores, tais como: massa volúmica, dimensão das partículas de madeira, quantidade e tipo de resina. O aglomerado de partículas de madeira é um material isotrópico no plano da placa, apresentando diferenças nos valores para a resistência e para a estabilidade dimensional pouco significativas se comparadas com a direcção perpendicular ao plano da placa [23].

Tal como outros painéis de derivados da madeira, os aglomerados de partículas são higroscópicos e a suas dimensões sofrem alterações com variações na humidade de 1%. O aglomerados de partículas devem, por isso, ser estabilizados em relação ao ambiente e só depois serem aplicados. O tempo para que o aglomerado de partículas esteja estabilizado e em equilíbrio com o ambiente em que está inserido depende da temperatura e da humidade relativa registadas.

É de esperar que os aglomerados de partículas contenham percentagens de humidade, de acordo com a humidade relativa existente, tal como se indica na tabela 2.2-1:

Tabela 2.2-1 Conteúdo de humidade do aglomerado de acordo com a humidade relativa
(*Wood Panel Industries Federation*)

Humidade Relativa a 20°C	Conteúdo de humidade do aglomerado
30%	7%
65%	11%
85%	15%

Os painéis de aglomerados de partículas não são susceptíveis de sofrerem ataques dos insectos xilófagos, mas a exposição continua em condições muito húmidas torna-os vulneráveis a ataques de fungos xilófagos.

As placas de aglomerados de partículas podem ser classificadas segundo vários pontos:

-processo de fabrico;

-estado da superfície;

-forma;

-tamanho e forma das partículas;

-estrutura da placa.

2.2.1.6 Painéis de aglomerado madeira-cimento (CBPB)

Os aglomerados de madeira-cimento (CBPB) são compostos por 75 a 80% de cimento e 20 a 25% de partículas de madeira. Este tipo de aglomerado não necessita da adição de resinas para garantir a coesão, sendo esta assegurada pelo ligante inorgânico (cimento). De forma semelhante ao que se passa com as placas de aglomerados de partículas, este tipo de painéis é também produzido numa estrutura com três camadas.

Uma desvantagem importante que estes aglomerados possuem é o seu peso elevado, o que dificulta o seu transporte e manuseamento. Por outro lado, demonstram um comportamento ao fogo e uma durabilidade biológica superiores quando comparados com os outros painéis [23].

A classificação deste tipo de placas, segundo a norma europeia, baseia-se em quatro pontos:

- 1)Tipo de ligante utilizado (cimento portland ordinário ou ligante à base de magnésio);
- 2)Acabamento de superfícies (bruta, lixada ou revestida);
- 3)Cor da superfícies (com ou sem coloração);
- 4)Se as faces e bordos estão trabalhados ou não.

2.2.1.7 Painéis de aglomerados de fibras de madeira

Definem-se painéis de aglomerados de fibras, todos aqueles que têm uma espessura nominal igual ou superior a 1.5mm e que sejam fabricados a partir de fibras lenho-celulósicas com a aplicação de calor e/ou pressão. A coesão primária entre fibras resulta do empastamento das fibras e das suas propriedades adesivas, ou da adição de uma resina sintética.

Tal como os aglomerados de partículas, estas placas caracterizam-se como sendo um material isotrópico no plano da placa, apresentando valores para a resistência com variações de apenas 10% em relação à direcção perpendicular. A estabilidade dimensional, no plano da placa, apresenta valores superiores aos apresentados pela madeira maciça, fruto da distribuição aleatória das fibras no seu interior. A figura 2.2-5 apresenta alguns tipos de aglomerados.

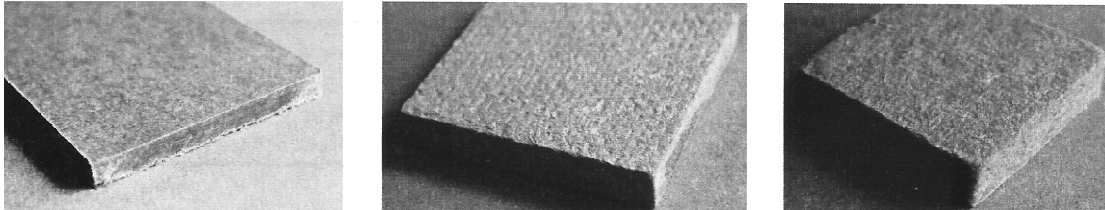


Figura 2.2-5 Placas de aglomerado de fibras: duro, semi-duro e brando (aglomerados de fibra por via húmida) (LNEC)

Os painéis de aglomerados de fibras estão separados em dois tipos fundamentais, que resultam das diferenças nos respectivos processos de fabrico e das suas massas volúmicas:

-aglomerados de fibra por via húmida – apresentam um teor de água nas fibras superior a 20% durante a formação do colchão de fibras, não sendo necessária a adição de resina sintética para garantir a coesão interna, que é assegurada pelo natural entrelaçar das fibras e pela acção da lenhina.

-aglomerados de fibras por via seca – na altura da formação do colchão apresentam um teor de água nas fibras inferior a 20%, geralmente perto dos 12%. Apresentam valores mínimos para a massa volúmica que são sensivelmente o dobro dos valores que caracterizam os aglomerados de fibras por via húmida na classe mais leve. A coesão interna é garantida pela adição de uma resina sintética.

As classes técnicas deste tipo de placas são estabelecidas tendo em conta o tipo de utilização (estrutural ou não estrutural) e o ambiente de exposição (seco, húmido ou exterior).

Agglomerados de fibras obtidos por via húmida

A produção destes aglomerados é semelhante aos obtidos por via seca, diferenciando-se apenas no processo de prensagem, que pode ser a quente ou a frio, enquanto que durante o fabrico dos aglomerados obtidos por via seca a prensagem é exclusivamente efectuada a quente. Podem ser utilizadas madeiras resinosas ou folhosas de clima temperado na produção destes aglomerados,

podendo também ser utilizadas fibras de papel reciclado (aglomerados de fibras duro com baixa densidade). Estes aglomerados são classificados segundo a sua massa volúmica:

- Aglomerado de fibras brando;
- Aglomerado de fibras semi-duro;
- Aglomerado de fibras duro.

Durante a fase de produção, ou através de um tratamento específico ou por adição de uma resina sintética ou outro aditivo, o aglomerado pode ver algumas das suas propriedades melhoradas: reacção ao fogo, resistência à humidade, durabilidade biológica e maquinabilidade.

Aglomerados de fibras obtidos por via seca (MDF)

Tal como no caso anterior a classificação efectua-se de acordo com a massa volúmica. A grande diferença em relação aos obtidos por via húmida, está no teor de água das fibras, à altura da composição do colchão de fibras e pelo facto de recorrer à utilização de resinas sintéticas com a função de garantir uma boa coesão interna do material. A resina mais usada é a ureia/formaldeído em situações com ambientes secos ou pouco húmidos, e a melamina/ureia-formaldeído, resinas fenólicas ou de isocianato em condições mais severas de humidade.

O MDF pode ser produzido com recurso a espécies folhosas ou resinosas, sendo que a produção actualmente se baseia mais nas espécies resinosas. De um modo geral a sua composição consiste numa média de 82% de fibra virgem, 10% de resina sintética, 7% de água, 1% de parafina e menos de 0,05% de sílica.

O processo típico de fabrico envolve a redução da madeira a pequenas aparas, sendo posteriormente amaciada termicamente. Sofre depois um processo de refinação mecânico até se obterem as fibras, que são misturadas com o ligante, uma resina sintética. As fibras impregnadas em resina são secas, sendo prensadas a quente até se obter a espessura desejada.

O MDF é também higroscópico, e uma variação de 1% no teor de humidade origina alterações de cerca de 0,4mm por metro linear.

A exposição deste tipo de painel em ambientes muito húmidos faz com que sejam susceptíveis de serem atacados por fungos xilófagos.

Têm uma aparência homogênea, apresentando uma estrutura por camadas como o aglomerado de partículas. A superfície final é suave, o que permite um acabamento perfeito [23].

3. Parte Experimental

O objectivo deste estudo é fornecer à Frezite dados que se tornem relevantes no desenvolvimento de novas fresas helicóides em carboneto de tungsténio para o trabalho de aglomerados de partículas. A base da análise é a realização de um estudo comparativo entre várias fresas de diferentes fabricantes, quer a nível de constituição, quer ao nível do desempenho durante a maquinagem.

O estudo começou pela selecção das fresas a analisar. Inicialmente, e para além da fresa da Frezite, foram seleccionadas quatro fresas dos mais directos concorrentes (Leuco, Leitz, Oertli e JSO). Foram também introduzidas nesta fase do estudo duas fresas realizadas em materiais com constituições diferentes dos aplicados nas restantes fresas (CTU06 e CTS(KCR)06). A introdução destas fresas no estudo foi fundamentada em experiências anteriores, com a aplicação destas em ambiente de trabalho real, que revelaram um comportamento bastante bom relativamente ao esperado no trabalho de aglomerados de partículas. Numa fase posterior do estudo foi introduzida uma nova fresa constituída por um material diferente, a Sinter-Sud, referenciada como tendo um comportamento muito bom.

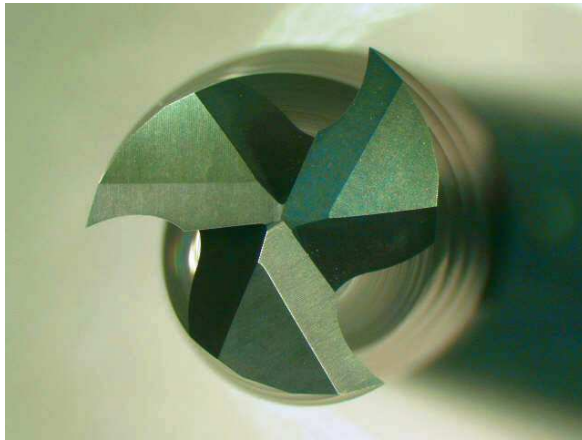
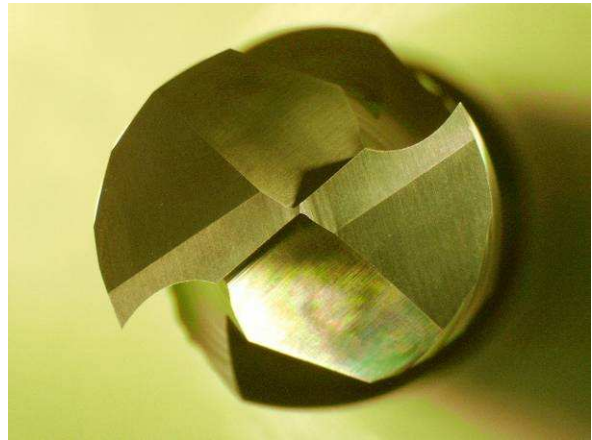
As fresas sujeitas a análise apresentavam geometrias diferentes entre os vários conjuntos. Foram fornecidas fresas de três e de duas hélices e fresas *Up* e *Up/Down*. Apesar da geometria não ser uma variável a considerar na investigação, mais propriamente no que se refere a comparações entre as diferentes configurações, é possível observar nas figuras 3-1 a 3-4 as diferenças entre 2 e 3 hélices e entre fresas *Up* e fresas *Up/Down*.



Figura 3-1 Fresa Up de 3 hélices



Figura 3-2 Fresa Up/Down de 2 hélices

**Figura 3-3** Fresa Up de 3 hélices**Figura 3-4** Fresa Up/Down de 2 hélices

Nas fresas *Up* a remoção da avara é no sentido ascendente, como tal, o corte é mais rápido, consequência da facilidade de extracção da avara de corte, sendo conseguido um melhor acabamento na face inferior da placa a trabalhar. Este tipo de fresa é indicada para materiais mais duros e a estabilidade verificada ao longo do corte resulta numa operação de corte suave. São também recomendadas para a realização de aberturas ou ranhuras, pois não acumulam as aparas resultantes do corte na ranhura. A acção ascendente que se verifica na fresa induz um movimento no sentido ascendente do material a maquinar, o que obriga a que a fixação do mesmo seja devidamente acautelada. Nas fresas *Down* o melhor acabamento é obtido na face superior e a velocidade de corte é inferior à verificada na fresa *Up*, fruto da avara ser removida no sentido descendente. Ou seja, é encaminhada na direcção do material dificultando a sua expulsão. Os avanços neste tipo de fresas são superiores, pois a força no sentido descendente que é aplicada na placa a trabalhar, contribuí para a estabilização do material a maquinar, permitindo aumentar o avanço de corte. Como tal, são recomendadas para peças pequenas ou máquinas manuais onde é difícil conseguir uma adequada estabilização da peça. No que se refere ao pó resultante da operação de corte, nas fresas *Down* a remoção deste é mais difícil, pois é arrastado no sentido descendente com a avara de corte. A figura 3-5 mostra uma imagem dos vários tipos de fresas referidos.

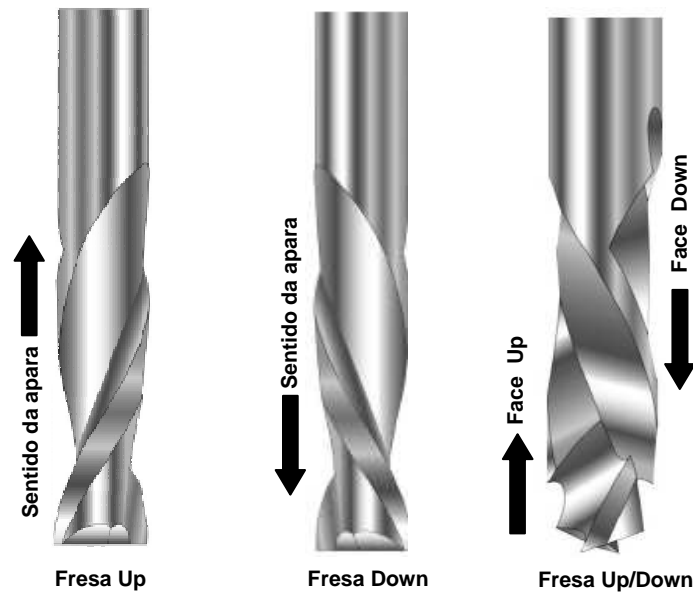


Figura 3-5 Fresas Up, Down e Up/Down (*MLCS Woodworking*)

A aplicação de fresas *Up/Down*, justifica-se em placas que necessitam um bom acabamento nas duas faces. As fresas *Up/Down* evitam a desintegração do aglomerado, na medida em que pressionam o material no sentido face-núcleo. A velocidade de corte poderá ter que ser reduzida para se obter um melhor acabamento. São recomendadas para madeiras duras e materiais densos, permitindo a aplicação de avanços elevados. As fresas com 3 hélices relativamente às fresas com 2 hélices possibilitam um melhor acabamento e um precisão dimensional superior. Quando é exigido um acabamento óptimo com avanços elevados este tipo de fresa é a melhor escolha. São também aplicadas quando a potência disponível não é suficiente para a realização da operação com uma fresa de 2 hélices. Como desvantagem, de referir, que devido ao menor espaço entre hélices pode ocorrer impedimento na livre saída da apara. O tempo de vida destas fresas é mais elevado.

O estudo comparativo entre as várias fresas foi desenvolvido por etapas, tendo sido analisados vários conjuntos de fresas, que terminou com a selecção das fresas que iriam ser ensaiadas numa situação de trabalho real. Na fase inicial da análise foi efectuada a caracterização microestrutural e a determinação das composições químicas das várias fresas. O passo seguinte foi a medição de durezas. O estudo laboratorial preliminar foi complementado com a realização de um ensaio de desgaste por esfera rotativa nos materiais das diferentes fresas e com a medição de rugosidades e a análise macrográfica nas várias fresas.

Como referido atrás, o estudo incidiu sobre vários conjuntos de fresas, designadamente três. O 1º conjunto fornecido era constituído por fresas helicóides *Up* de 3 hélices (fig. 3-6) e por pastilhas com Ø de 16 e 22mm (fig. 3-7).

1º Conjunto:

- Frezite;
- Leuco;
- Leitz;
- Oertli;
- JSO;
- CTU06 (apenas pastilha – 1x);
- CTS(KCR)06 (apenas pastilha – 1x).



Figura 3-6 1º conjunto de fresas



Figura 3-7 Pastilhas para ensaio de desgaste (1º conjunto+Sinter-Sud)

Após a caracterização microestrutural, e a determinação da dureza dos diferentes materiais do 1º conjunto e na sequência do resultados obtidos nos ensaios de desgaste e medições de rugosidade, foi decidido passar a uma segunda fase da análise.

Nesta segunda etapa, tendo em conta os resultados dos ensaios anteriores foi efectuada uma selecção dos materiais que iriam ser ensaiados em ambiente de trabalho real. Foi determinado que para além do material da Frezite, também o material com a referência CTS(KCR)06 faria parte do 2º conjunto de fresas a fornecer pela Frezite, devido a apresentar um dos melhores comportamentos ao desgaste. Para além destes dois materiais foi admitida no estudo uma nova fresa, a Sinter-Sud. Esta fresa, foi introduzida nesta etapa da análise com base em indicações que referiam um bom comportamento no trabalho de derivados de madeira. A determinação da dureza, assim como o ensaio de desgaste e a medição de rugosidades foram também realizados para esta nova fresa.

As fresas que constituem o 2º conjunto são fresas *Up/Down* de 2 hélices. Os ensaios de caracterização destas fresas revelaram grande dispersão nos valores das rugosidades que levaram à rejeição destas fresas. Foi então produzido um novo conjunto (3º) de fresas, com um controlo de fabrico mais apertado.

2º / 3º Conjunto:

- Frezite;
- CTS(KCR)06;
- Sinter-Sud.

De referir que a geometria das fresas que fazem parte desta segunda fase da análise é semelhante entre elas. Todas foram construídas com recurso ao mesmo kit de mós. A figura 3-8 mostra o aspecto destas fresas.



Figura 3-8 3º conjunto de fresas

Depois de realizada a caracterização dos materiais e efectuada a respectiva selecção, foram então levados a cabo os testes em ambiente de trabalho real para avaliar o comportamento das três fresas na maquinagem de aglomerados de partículas. Estes testes foram realizados na empresa Vicaima e decorreram segundo intervalos pré-definidos. Entre os vários intervalos dos testes foram realizadas medições de rugosidade e registos macrográficos das fresas em questão, com o propósito de registar a evolução do desgaste nas mesmas.

3.1 Caracterização química e microestrutural

A utilização de microscopia óptica na análise das amostras não permite chegar a qualquer conclusão, resultado do tamanho de grão em causa ser demasiado pequeno. Como tal, com recurso a microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raios X foi possível a obtenção de imagens que permitiram observar com nitidez a distribuição dos grãos, assim como a determinação da composição química dos diversos materiais. Na tabela 3-1 encontram-se indicados os valores dos diferentes elementos (C, W, Co) detectados a partir dos espectros apresentados em anexo.

Tabela 3-1 Composição química dos materiais analisados

Fresa	% C	% W	% Co
Frezite	3,80	88,14	8,06
CTS (KCR) 06	4,37	93,69	1,94
Leuco	4,36	86,70	8,94
Oertli	3,52	87,67	8,61
Leitz	3,98	87,15	8,86
JSO	3,92	86,72	9,36
CTU06	4,14	94,11	1,75

Da análise aos valores encontrados verifica-se que as amostras CTU06 e CTS(KCR)06 apresentam valores para o aglutinante (cobalto) significativamente mais baixos do que os detectados para as restantes amostras, o que se traduz num aumento da percentagem do tungsténio. Relativamente ao conteúdo de carbono, vê-se que a amostra Leuco, que apresenta valores dentro da gama encontrada para as amostras CTU06 e CTS(KCR)06, isto apesar dos seus valores de cobalto estarem próximos dos detectados nas outras amostras.

As imagens foram obtidas por electrões retrodifundidos, que permitem distinguir os diferentes materiais, derivado da diferença de densidades, apresentando-se assim diferentes tonalidades. Com as imagens obtidas foi caracterizada a distribuição das partículas de carboneto de tungsténio, delineando manualmente as fronteiras de grão. Na figura 3-9 ilustra-se um exemplo

de uma microestrutura com os grãos delineados para sua caracterização. Esta definição dos grãos permitiu o cálculo da respectiva área², possibilitando assim avaliar a distribuição do tamanho das partículas em cada amostra, tal como se representa no gráfico 3-1.

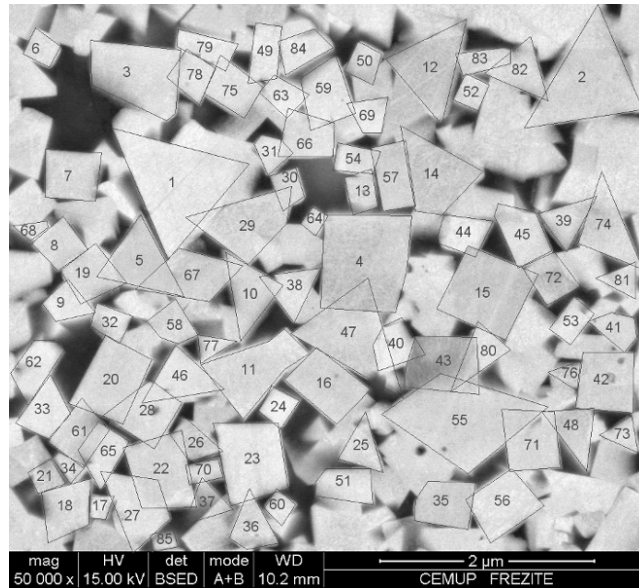


Figura 3-9 Microestrutura da amostra Frezite delineada

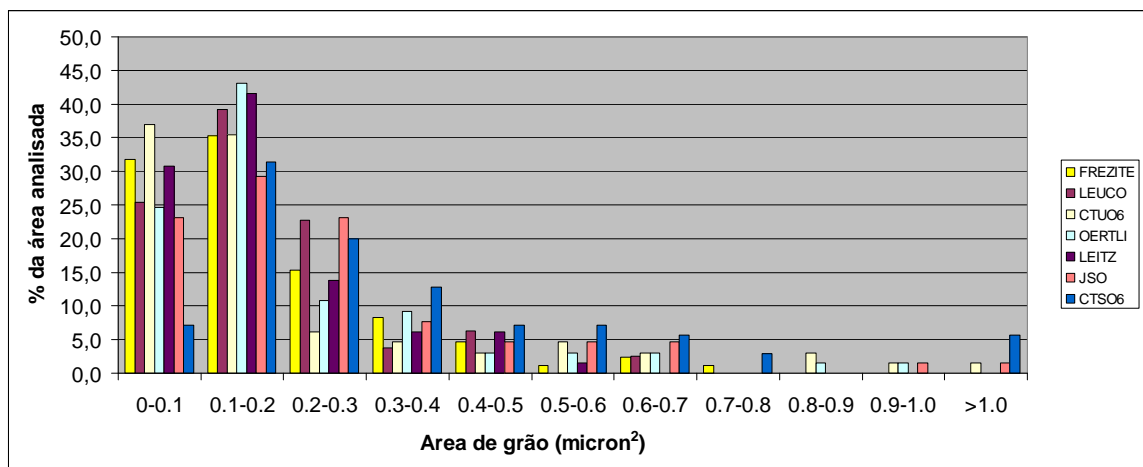


Gráfico 3-1 Distribuição do tamanho de grão de WC nas várias amostras

No gráfico acima constata-se que nas amostras CTU06 e CTS(KCR)06 a distribuição do tamanho dos grãos de WC é mais alargada, verificando-se a presença nestas duas amostras de grão mais grosseiro com uma maior frequência. A tabela 3-2 apresenta os valores médios para a área de

² A área dos grãos foi determinada com recurso ao software de análise de imagem ImageJ.

grão dos diferentes materiais. É possível verificar um tamanho de grão muito próximo nas fresas Frezite, Leuco e Leitz, sendo que as fresas Oertli, JSO e CTU06 apresentam valores ligeiramente superiores. A fresa CTS(KCR)06 destaca-se das demais apresentando um valor médio para a área de grão substancialmente superior.

Tabela 3-2 Área média de grão

Fresa	Área média (μm^2)
Frezite	0,19
Leuco	0,18
Leitz	0,18
Oertli	0,22
JSO	0,25
CTS(KCR)06	0,38
CTU06	0,23

Na figura 3-10 são apresentadas as microfotografias, de todos os materiais, que foram registadas com ampliações de 2500x, 20000x e 50000x. Nestas é possível observar as principais diferenças entre as várias amostras. Nas amostras CTU 06 e CTS(KCR)06 é visível a menor quantidade de cobalto (zonas mais escuras) que entra na sua constituição, assim como a presença de grão com maior dimensão na CTS(KCR)06. A amostra Leuco é aquela que aparenta ter uma distribuição granular mais homogênea.

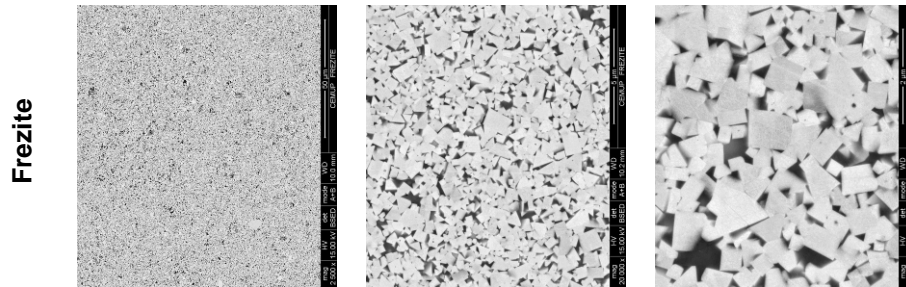


Figura 3-10 Microfotografias dos vários materiais utilizados

3.2 Dureza

Foram determinadas as microdurezas HV das amostras com uma carga de 200g, recorrendo a um microdurometro *Shimadzu HMV-2000*. A carga foi aplicada durante um intervalo de tempo de 10 a 15 segundos. A tabela 3-3 descreve os valores médios das medições efectuadas.

Tabela 3-3 Dureza HV 200g dos vários materiais

Amostra	Dureza HV (200g)
Frezite	1611
CTS (KCR) 06	1816
Sinter Sud	1636
Leuco	1602
Oertli	1610
Leitz	1597
JSO	1593
CTU06	1876

As amostras CTU06 e CTS(KCR)06 apresentam uma dureza superior, facto esperado, pois o seu conteúdo de cobalto é inferior, sendo o aumento do conteúdo deste inversamente proporcional ao aumento da dureza. Já no que se refere ao aumento da dureza com a diminuição do tamanho de grão, a amostra CTS(KCR)06 não segue este pressuposto.

3.3 Ensaio de desgaste

Os ensaios de desgaste foi efectuado recorrendo ao método de esfera rotativa com pó abrasivo, carboneto de silício - *Silicon Carbide Powder – 1200 GRIT* - (100ml de H₂O+20g SiC), utilizando um tribómetro (*PLINT TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester*). As figuras 3-11 e 3-12 é ilustrado este ensaio.



Figura 3-11 Vista geral do tribómetro do INEGI

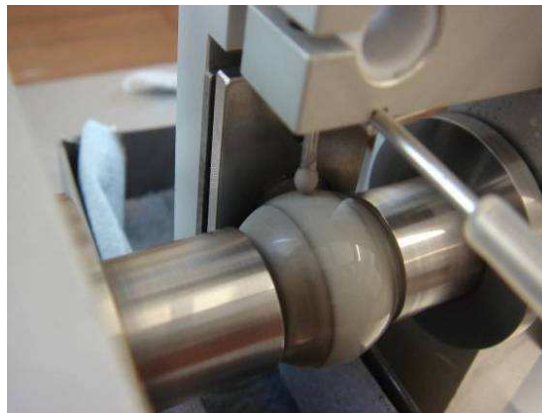


Figura 3-12 Pormenor da esfera em contacto com a pastilha

O ensaio de desgaste de microabrasão por esfera rotativa consiste na rotação de uma esfera, que foi previamente atacada com nital para adquirir alguma rugosidade e assim arrastar a solução abrasiva que está presente, em contacto com um provete plano. A solução abrasiva vai provocar desgaste no provete plano com a forma de calote esférica. Através da medição do diâmetro em duas direcções perpendiculares da calote é possível determinar o volume desgastado, o qual é dado pela seguinte expressão:

$$V = \pi \frac{a^4}{64 \times R}$$

(3-1)

onde V representa o volume desgastado em mm^3 , R o raio da esfera (mm) e a a média dos diâmetros medidos (mm).

Para determinar o coeficiente de desgaste é aplicada a seguinte equação:

$$K_s = \frac{V}{S \times N}$$

(3-2)

A variável N é a carga aplicada ou a força normal aplicada (N) e S a distância de escorregamento (mm) [24].

O ensaio de desgaste foi efectuado ao 1º conjunto de fresas/pastilhas fornecido, tendo sido posteriormente realizado também para o material da fresa Sinter-Sud. Das fresas integrais foram retiradas duas pastilhas para a realização do ensaio de desgaste.

Neste ensaio de desgaste a sequência utilizada foi de 100, 200, 300, 500 e 700 rotações da esfera. Foram realizadas duas sequências para cada material. Os ensaios foram realizados utilizando uma esfera de aço com 12,5mm de raio e com uma velocidade de rotação constante de 45 rpm. A carga aplicada foi de 0,25N. Após o ensaio, a calote obtida foi observada em microscópio óptico para determinação do diâmetro da calote de desgaste (fig. 3-13).

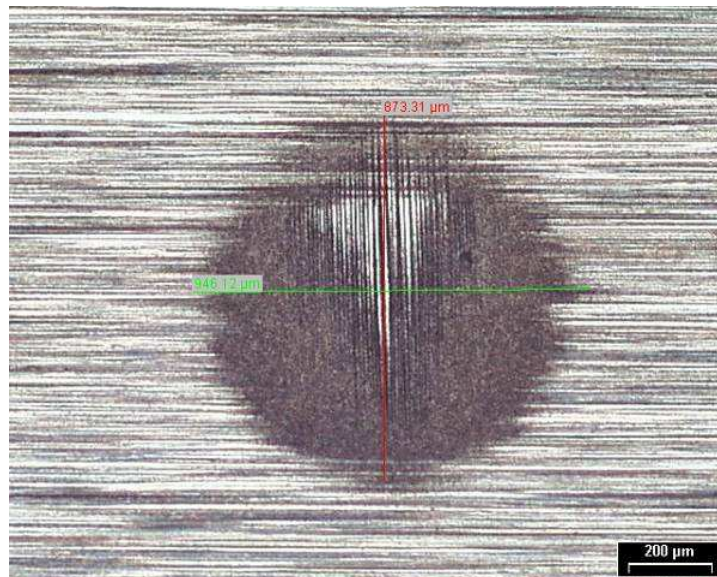


Figura 3-13 Exemplo de calote de desgaste

Os gráficos 3-2 e 3-3 ilustram o volume desgastado em função do número de rotações e distância de escorregamento, respectivamente, para este ensaio.

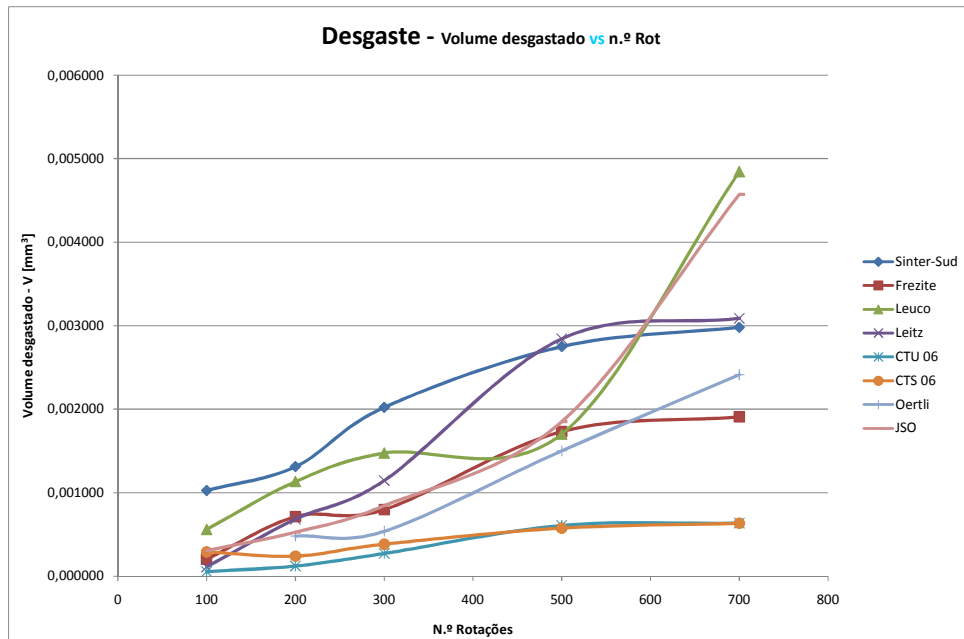


Gráfico 3-2 Volume desgastado vs nº rotações

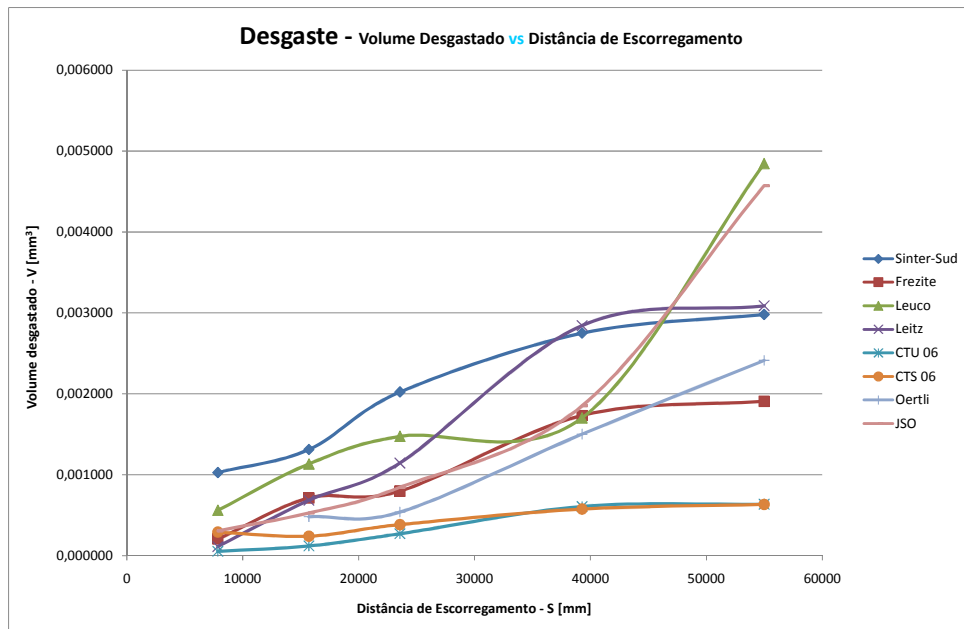


Gráfico 3-3 Volume desgastado vs distância de escorregamento

Apesar de ser possível identificar quais os materiais com o melhor comportamento ao desgaste (CTU06 e CTS(KCR)06), as pastilhas que foram sujeitas a desgaste apresentavam acabamentos superficiais distintos entre elas, o que contribuiu para introduzir dispersões acentuadas nos resultados finais, como por exemplo, comportamentos muito distintos entre as duas sequências para o mesmo material. Face a tal facto, decidiu-se rectificar todas as amostras, de forma a obter o mesmo acabamento superficial em todas as pastilhas. Para garantir a qualidade deste acabamento foram determinadas as rugosidades (ponto 3.4.1) das pastilhas após a rectificação.

Depois de comprovada a qualidade superficial das pastilhas procedeu-se à realização do 2º ensaio de desgaste. Os resultados deste ensaio estão ilustrados nos gráficos 3-4 e 3-5.

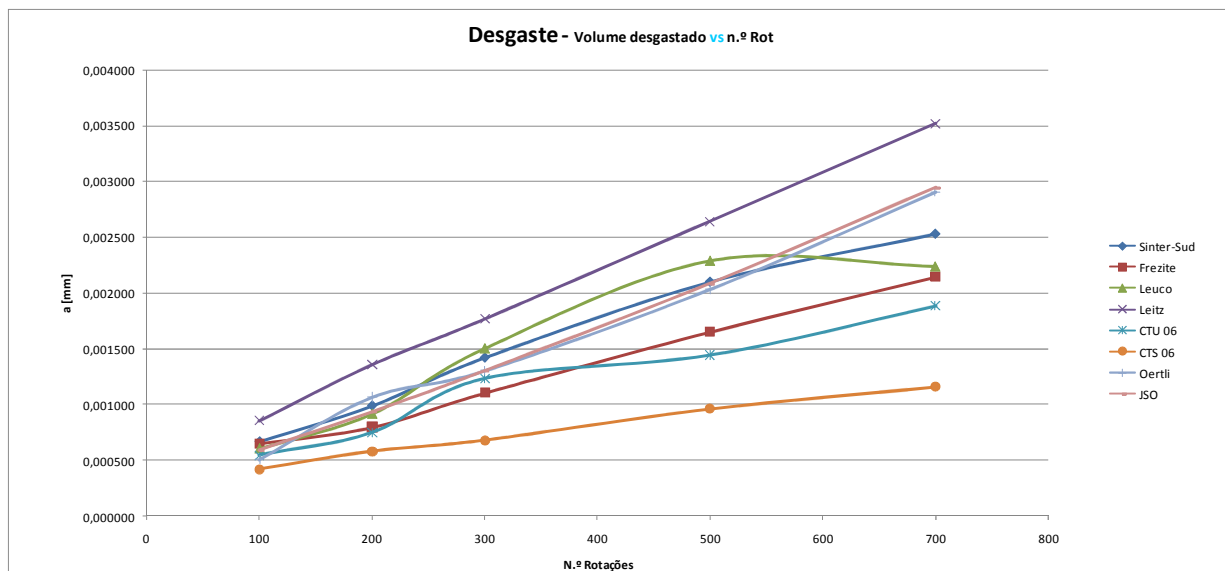


Gráfico 3-4 Volume desgastado vs nº rotações

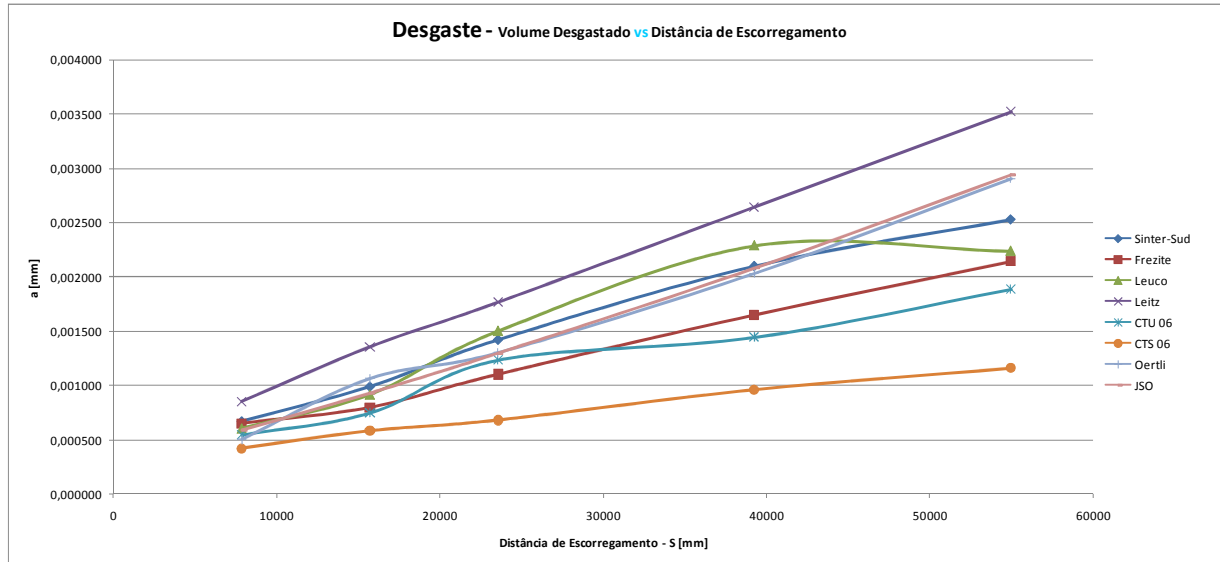


Gráfico 3-5 Volume desgastado vs distância de escorregamento

É possível observar um comportamento mais uniforme ao longo do ensaio de desgaste. Há uma evolução linear no comportamento dos vários materiais, com exceção do material da Leuco que na última etapa sofre um decréscimo no volume desgastado. A fresa CTS(KCR)06 continua a apresentar o melhor comportamento, sendo de destacar neste 2ºensaio a diminuição no desempenho ao desgaste da fresa CTU06, em comparação com o verificado no 1ºensaio. O material da Frezite continua a apresentar um bom comportamento dentro do conjunto ensaiado. O material da Sinter-Sud, ao contrário do verificado no 1ºensaio, demonstrou um comportamento dentro da média. Neste 2ºensaio a fresa da Leitz destaca-se claramente das restantes pela negativa, evidenciando o pior desempenho.

3.4 Medição de rugosidades

A determinação da rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro *HOMMELWERKE T8000* mostrado na figura 3-14. Foram medidos os parâmetros R_a (Rugosidade média aritmética), R_{max} (Profundidade máxima da rugosidade) e R_z (Profundidade média da rugosidade).



Figura 3-14 Rugosímetro Hommelwerke T8000

A figura 3-15 mostra um pormenor de medição da rugosidade numa fresa.



Figura 3-15 Pormenor do apalpador em contacto com a fresa

A rugosidade média aritmética R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de perfil em relação à linha média. Se definirmos a função $Z(x)$ como a distância entre cada ponto do perfil e a linha média do comprimento, R_a é dado por:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} Z(x) dx$$

(3-3)

Este parâmetro é o critério mais utilizado, pela sua simplicidade e pela sua insensibilidade a picos ou vales despropositados, no entanto deve ser sempre complementado com o R_z ou o R_{max} .

A profundidade máxima da rugosidade R_{max} é o valor máximo da profundidade individual da rugosidade R_{zi} (distância entre o maior pico e o maior vale no comprimento de base L) detectada no comprimento de cálculo (L_m).

A profundidade média da rugosidade R_z (fig. 3-16) pode ser definida de duas maneiras. A norma ISO 468 define-a como a distância média entre os cinco pontos mais altos dos picos e os cinco pontos mais baixos dos vales, pesquisados no comprimento de base medido a partir de uma linha paralela à linha média e não cortando o perfil, sendo dada por:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 z_{pi} - \sum_{i=1}^5 z_{vi} \right) \quad (3-4)$$

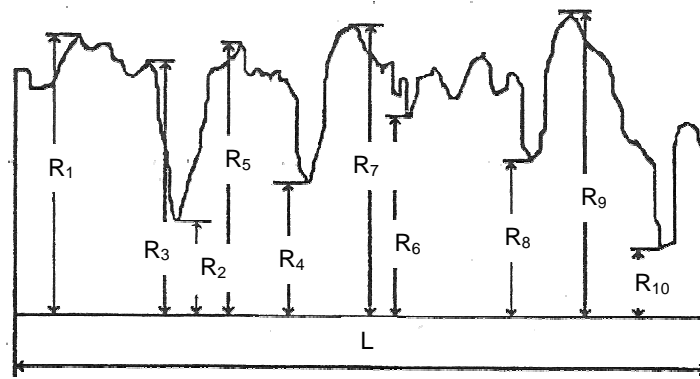


Figura 3-16 Profundidade média da rugosidade (R_z) segundo a norma ISO 468 [25]

A norma DIN 4768 define R_z (fig. 3-17) como a média aritmética da profundidade individual da rugosidade de cinco comprimentos de base (L) sucessivos, sendo dada por:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{zi} \quad (3-5)$$

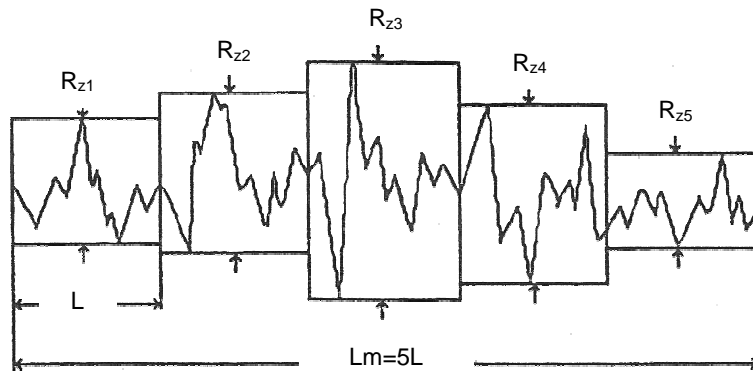
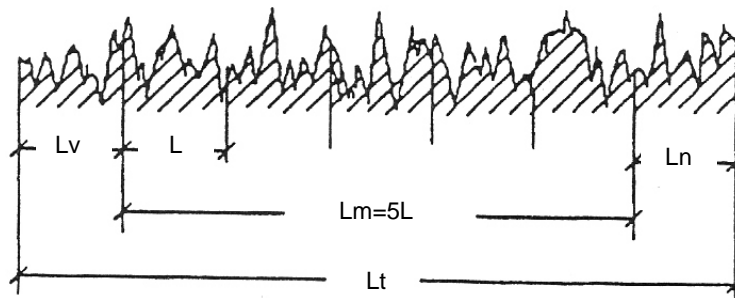


Figura 3-17 Profundidade média da rugosidade (R_z) segundo a norma DIN 4768 [25]

Na figuras seguintes demonstram-se os conceitos de comprimento de base (L), comprimento de cálculo (L_m) e comprimento de palpagem (L_t) que são aplicados na determinação dos parâmetros de rugosidade [25].



- L-Comprimento de base "cut-off"
- L_m -Comprimento de cálculo
- L_v -Primeiro comprimento de palpagem
- L_n -Último comprimento de palpagem
- L_t -Comprimento de palpagem ou exploração

Figura 3-18 Esquema dos diversos comprimentos de medida utilizados na rugosidade [25]

O primeiro e o último comprimento de palpagem não são utilizados para efeito de cálculo dos parâmetros, por corresponderem às fases de aceleração e desaceleração do dispositivo de medida, podendo introduzir erros na medição.

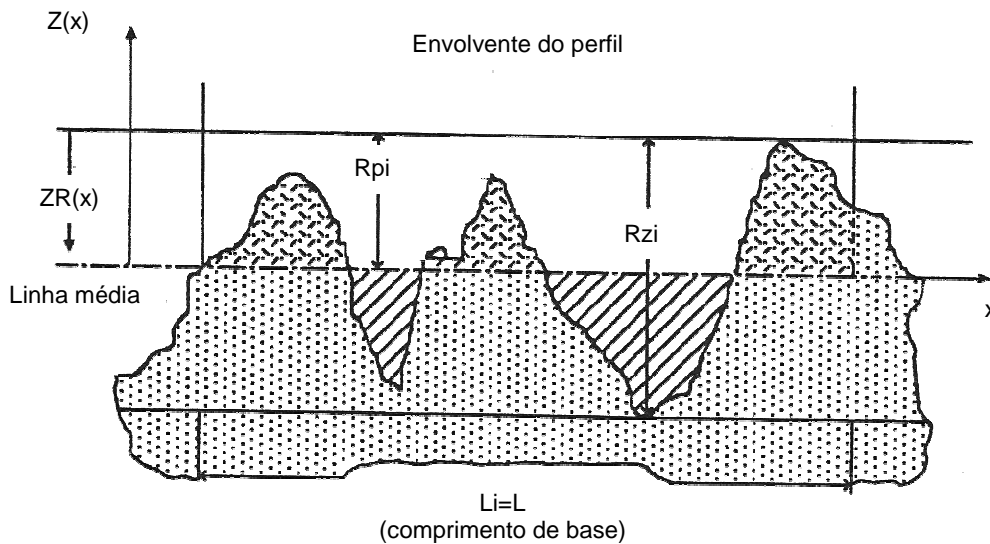


Figura 3-19 Definição do conceito de linha média e de parâmetros (R_{zi} e R_{pi}) [25]

3.4.1 Rugosidade das pastilhas de desgaste

Tal como referido no ponto anterior, face à heterogeneidade dos acabamentos superficiais das pastilhas usadas no 1º ensaio de desgaste procedeu-se a uma rectificação das mesmas.

Para assegurar que todas apresentavam um acabamento superficial semelhante, após a rectificação, foi efectuada a medição de rugosidades nas superfícies a ensaiar, estando os valores obtidos indicados na tabela 3-4 e gráfico 3-6.

Tabela 3-4 Rugosidades das pastilhas para o ensaio de desgaste

	Frezite	Leitz	JSO	Oertli	Leuco	Sinter Sud	CTU06	CTS(LCR)06
R_a (μm)	0,32	0,33	0,29	0,28	0,30	0,37	0,33	0,33
R_{max} (μm)	2,92	2,85	2,34	2,16	2,31	2,94	2,67	2,44
R_z (μm)	2,27	2,33	1,96	1,88	1,99	2,49	2,28	2,09
Comprimento de palpagem - L_t (mm)				4,80				
Comprimento de base "Cut-off" - L (mm)				0,8				

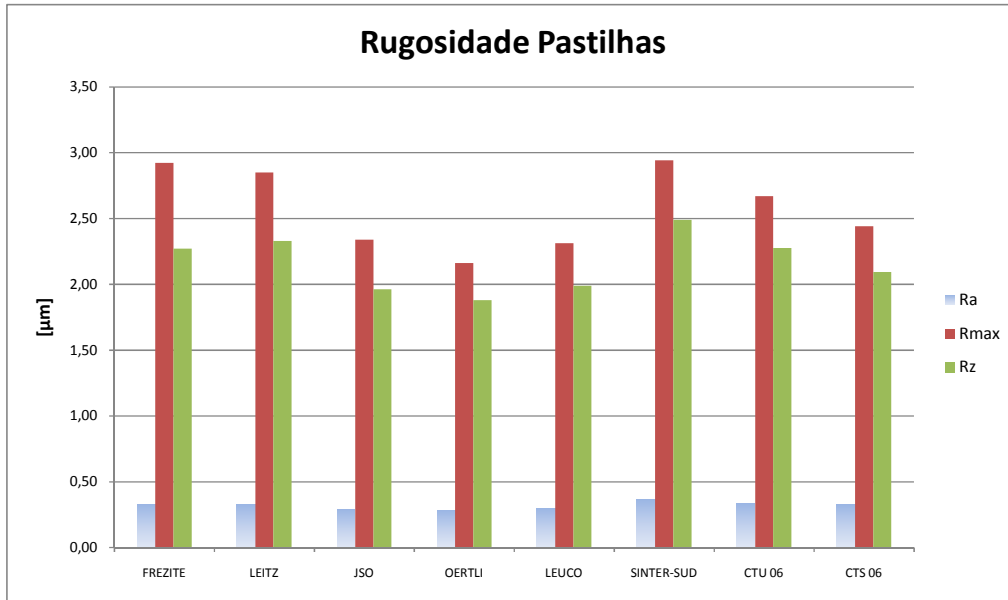


Gráfico 3-6 Representação gráfica da rugosidade das pastilhas

Face a estes resultados, conclui-se que a nova rectificação gerou acabamentos adequados para a repetição do ensaio de desgaste.

3.4.2 Rugosidade das fresas do 1º conjunto

No que se refere às medições de rugosidades nas fresas, foram efectuados ensaios de rugosidade, com análise dos parâmetros R_a , R_z e R_{max} às fresas Frezite, Leitz, JSO, Oertli e Leuco (tabela 3-5 e gráficos 3-7 a 3-9). Neste conjunto não foram fornecidas fresas integrais CTU06 e CTS(KCR)06

Tabela 3-5 Rugosidades do 1º conjunto de fresas

	Frezite	Leitz	JSO	Oertli	Leuco
R_a (µm)					
Top	0,14	0,34	0,24	0,14	1,02
Up	0,14	0,30	0,27	0,15	0,11
R_{max} (µm)					
Top	0,79	1,75	1,09	1,09	6,29
Up	0,95	2,04	1,82	0,95	0,95
R_z (µm)					
Top	0,72	1,64	0,94	0,92	5,09
Up	0,77	1,70	1,36	0,77	0,65
Comprimento de palpagem - L_t (mm)			4,80		
Comprimento de base "Cut-off" - L (mm)			0,8		

Numa primeira abordagem é de salientar que a fresa da Leuco apresenta valores para a rugosidade na face *Top* acima da média dos valores encontrados em todas as outras fresas. Na face *Up*, os valores obtidos não indicam variações relevantes para as várias fresas.

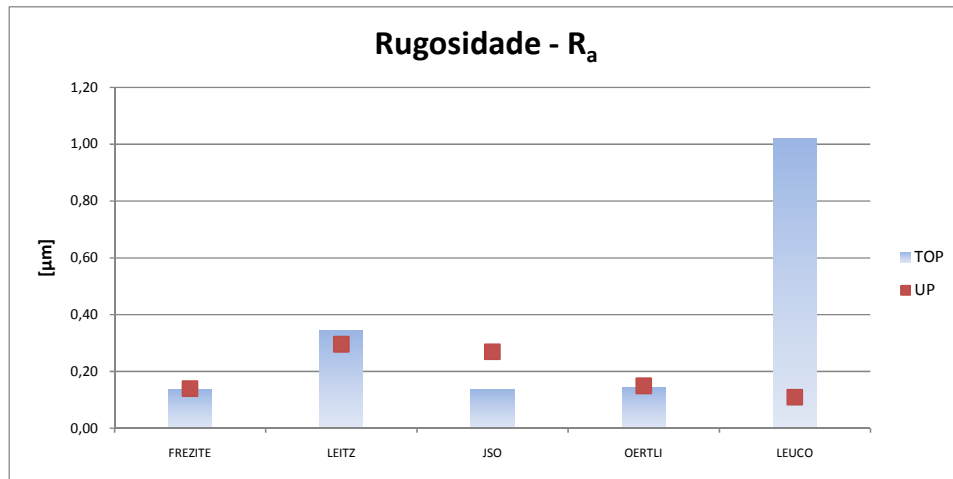


Gráfico 3-7 Rugosidade R_a (1º conjunto)

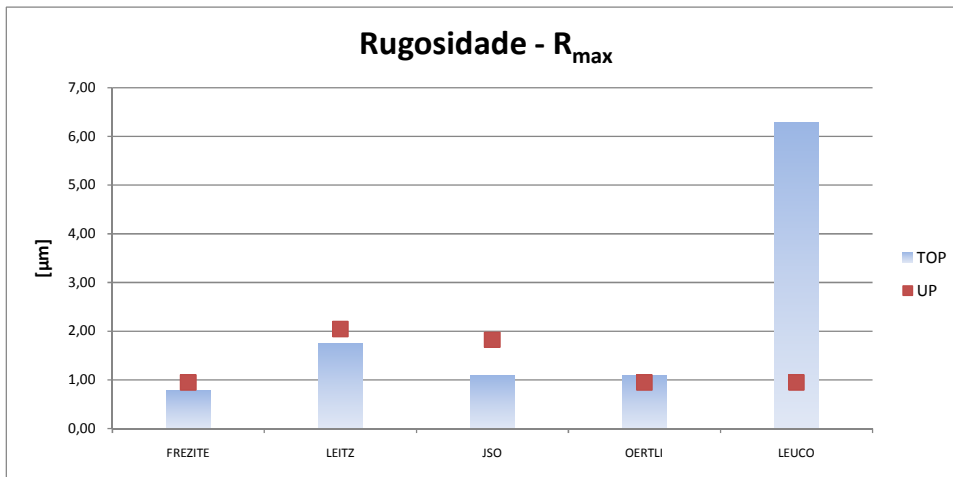


Gráfico 3-8 Rugosidade R_{max} (1º conjunto)

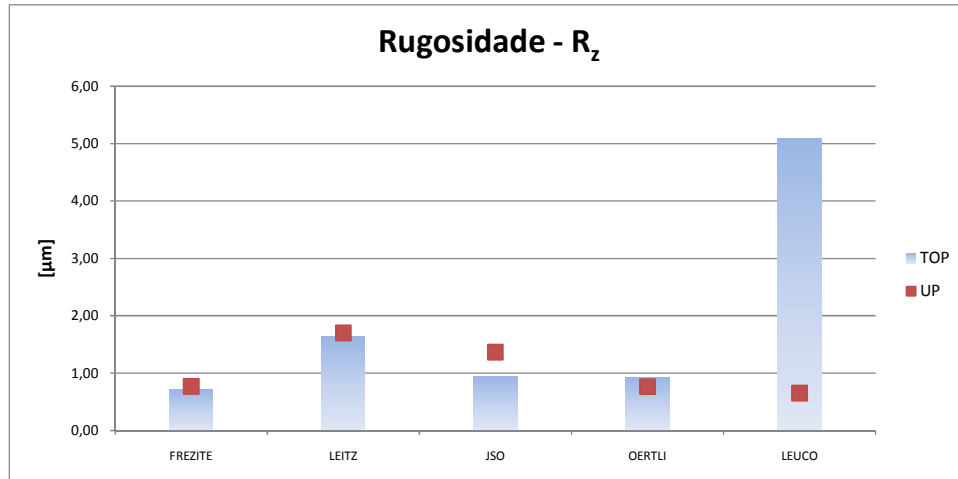


Gráfico 3-9 Rugosidade Rz (1º conjunto)

3.4.3 Rugosidade das fresas do 2º e 3º conjuntos

Depois de seleccionadas as fresas a testar em ambiente real (Frezite, CTS(KCR)06 e Sinter-Sud, por terem sido as que forneceram as melhores indicações), procedeu-se à medição das respectivas rugosidades. Foram fornecidos 2 exemplares de cada fresa.

Tal como no caso anterior, foi feita uma abordagem aos parâmetros R_a , R_{max} e R_z . Os valores médios das medições (no mínimo foram sempre efectuadas 3 medições) estão descritos na tabela 3-6 e gráficos 3-10 e 3-12.

Tabela 3-6 Rugosidades do 2º conjunto de fresas

	Frezite 1	Frezite 2	CTS(KCR)06 1	CTS(KCR)06 2	Sinter Sud 1	Sinter Sud 2
R_a (µm)						
Top	0,26	0,24	0,13	0,15	0,33	0,23
Up	0,24	0,29	0,12	0,21	0,12	0,12
Down	0,10	0,10	0,07	0,07	0,11	0,11
R_{max} (µm)						
Top	1,77	1,12	0,82	0,70	1,72	1,03
Up	1,34	1,86	0,87	1,28	0,94	1,00
Down	0,87	0,62	0,53	0,44	0,80	0,76
R_z (µm)						
Top	1,29	1,00	0,82	0,70	1,72	1,03
Up	1,00	1,65	0,87	1,28	0,94	1,00
Down	0,54	0,54	0,53	0,44	0,80	0,76
Comprimento de palpagem - L_t (mm)			Comprimento de base "Cut-off" - L (mm)			
Top	4,80		0,8			
Up	1,50		0,25			
Down	1,50		0,25			

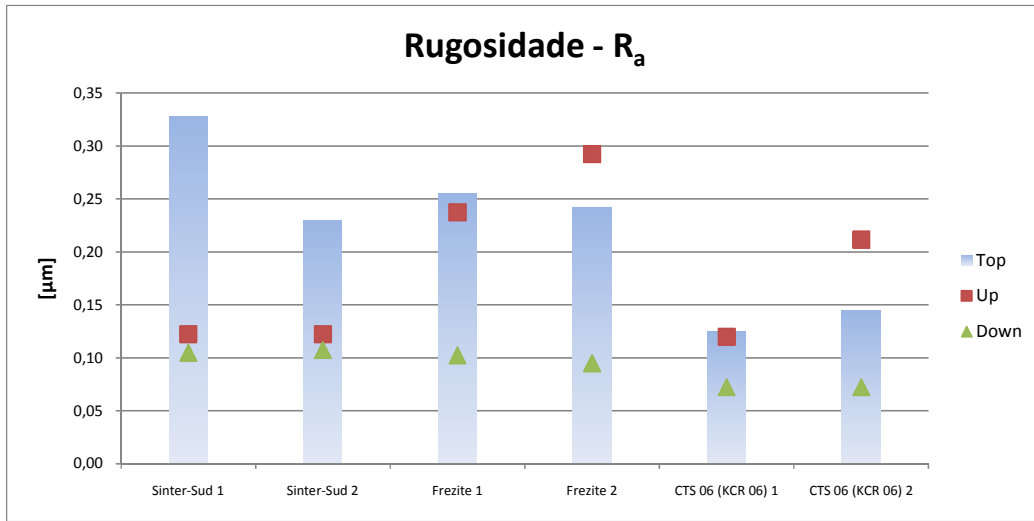


Gráfico 3-10 Rugosidade R_a (2^o conjunto)

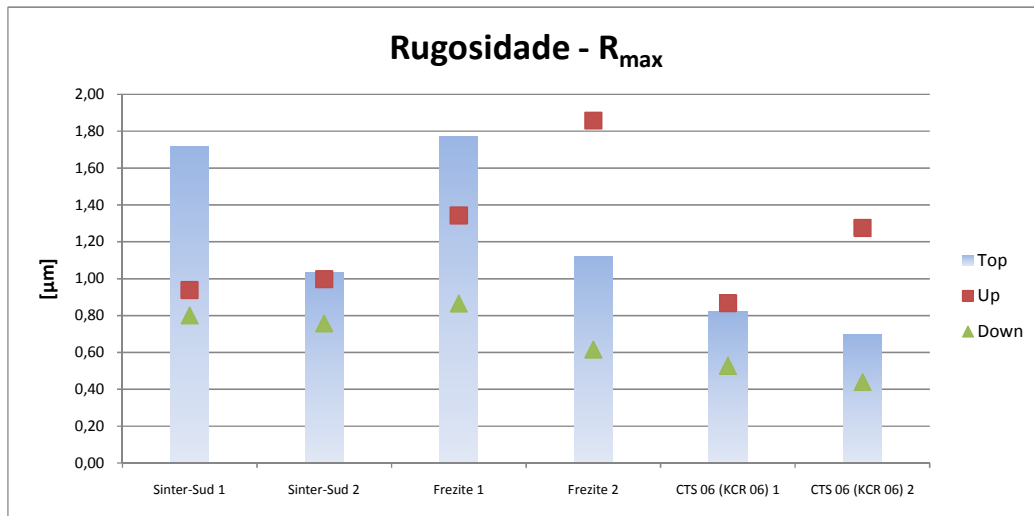


Gráfico 3-11 Rugosidade R_{max} (2^o conjunto)

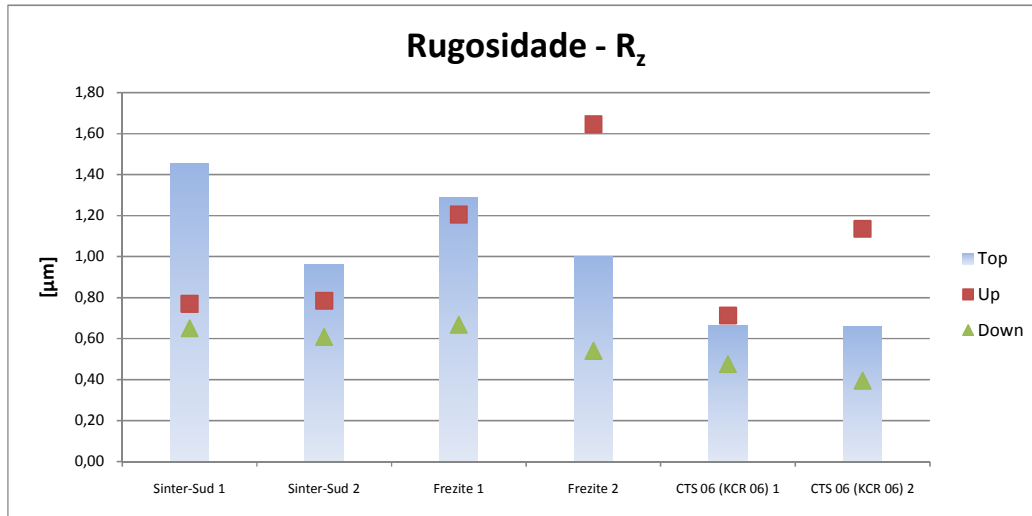


Gráfico 3-12 Rugosidade R_z (2ºconjunto)

A análise aos parâmetros de rugosidade medidos permite constatar que na face *Down* não existem diferenças significativas entre as 6 fresas. No entanto, a face *Up* apenas mostrou homogeneidade nas fresas Sinter-Sud, apresentando valores semelhantes. Nas fresas Frezite e CTS(KCR)06 os valores registados exibem variações relevantes entre as 2 fresas da mesma marca. Da mesma forma estes valores são díspares entre marcas diferentes.

As medições realizadas às faces *Top* revelaram uma homogeneidade integral apenas no par de fresas CTS06(KCR)06 para todos os parâmetros R_a , R_{max} e R_z , e apenas alguma semelhança entre valores de R_a para as fresas Frezite.

Em virtude da variação dos valores da rugosidade das fresas (Frezite, CTS(KCR)06 e Sinter-Sud) e pelo facto de não existir justificação para tal ocorrência, pois todas as seis fresas haviam sido produzidas na Frezite com recurso ao mesmo kit de mós, foi decidido que iriam ser produzidas com muito maior controlo novas fresas das mesmas marcas e configurações, de modo a eliminar eventuais erros que poderiam ser introduzidos em análises comparativas futuras.

As medições de rugosidades foram então repetidas para as novas de fresas Sinter-Sud, Frezite e CTS(KCR)06 (3ºconjunto). Neste conjunto foram fornecidos 3 exemplares de cada marca (os valores obtidos encontram-se indicados na tabela 3-7 e gráficos 3-13 a 3-15).

Tabela 3-7 Rugosidades do 3º conjunto de fresas

	Frezite 1	Frezite 2	Frezite 3	CTS(KCR) 06 1	CTS(KCR) 06 2	CTS(KCR) 06 3	Sinter Sud 1	Sinter Sud 2	Sinter Sud 3	
R_a (μm)										
Top	0,22	0,22	0,08	0,05	0,16	0,09	0,19	0,21	0,13	
Up	0,18	0,14	0,13	0,15	0,13	0,11	0,20	0,15	0,12	
Down	0,09	0,06	0,08	0,05	0,05	0,08	0,08	0,09	0,06	
R_{max} (μm)										
Top	0,95	0,89	0,48	0,34	0,71	0,54	0,81	0,93	0,59	
Up	0,92	0,84	0,77	0,70	0,63	0,57	1,51	1,18	0,63	
Down	0,70	0,57	0,47	0,46	0,37	0,49	0,64	0,52	0,34	
R_z (μm)										
Top	0,87	0,85	0,44	0,31	0,67	0,49	0,76	0,86	0,55	
Up	0,71	0,63	0,65	0,53	0,45	0,47	1,12	0,86	0,56	
Down	0,50	0,36	0,32	0,35	0,29	0,39	0,44	0,47	0,26	
Comprimento de palpagem - L_t (mm)					Comprimento de base "Cut-off" - L (mm)					
Top					4,80				0,8	
Up					1,50				0,25	
Down					1,50				0,25	

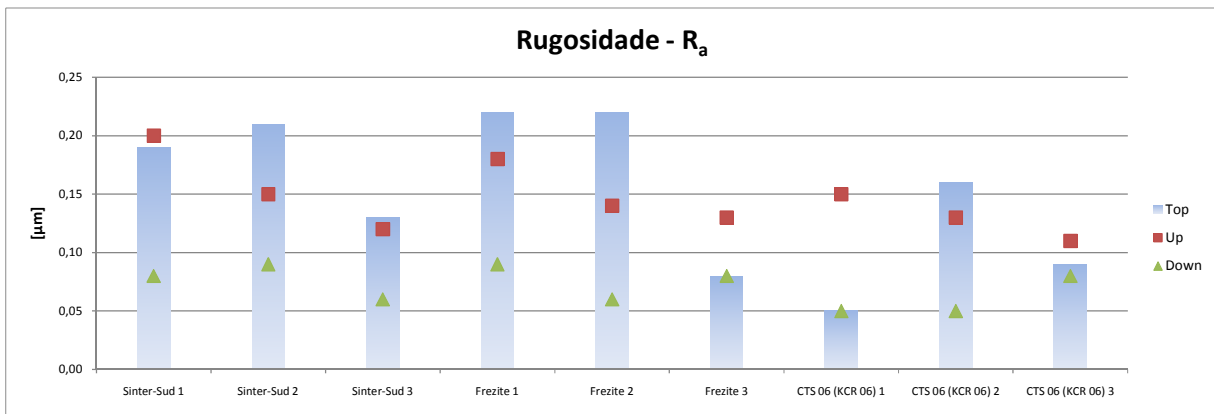


Gráfico 3-13 Rugosidade R_a (3ºconjunto)

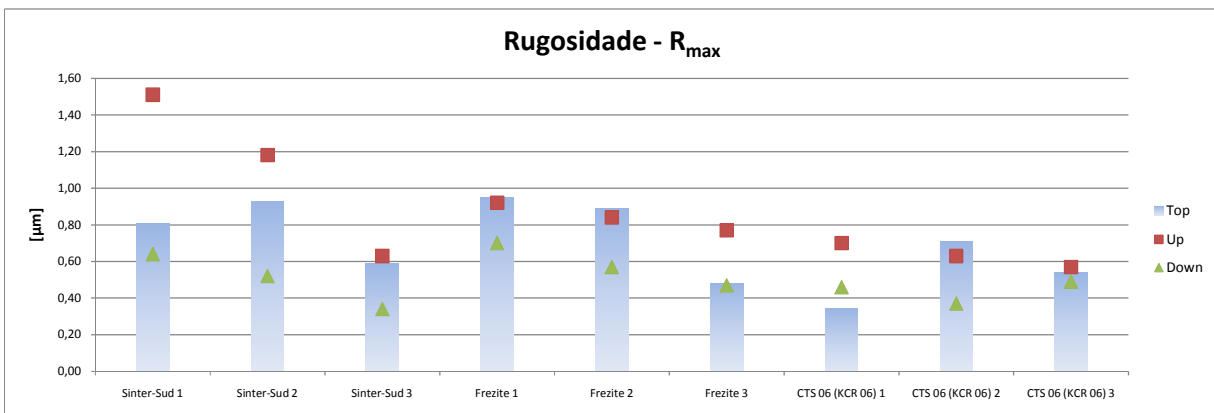


Gráfico 3-14 Rugosidade R_{max} (3ºconjunto)

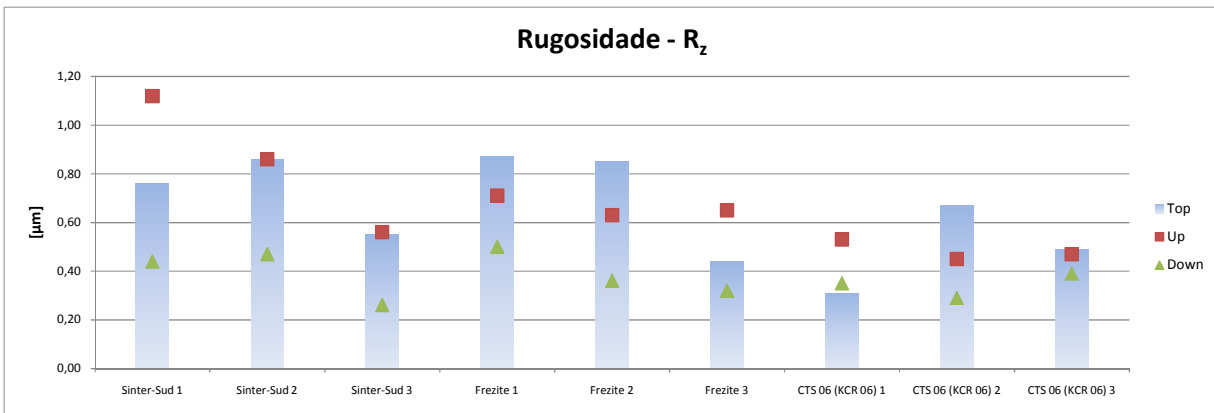


Gráfico 3-15 Rugosidade R_z (3º conjunto)

Os valores obtidos indicam que se atingiu o objectivo proposto de redução da rugosidade das superfícies das fresas. Embora existam ainda alguns picos de rugosidade, estes não parecem ser relevantes, uma vez que se está já a trabalhar numa gama de rugosidades bastante baixa. Desta forma está por isso garantida a homogeneidade entre as várias fresas a analisar.

Este rigor de análise e medições realizadas permitiu à empresa constatar a importância de um controle rigoroso do processo de fabrico e do tipo de acabamento produzido nas fresas, uma vez que estes condicionam a vida futura das ferramentas que comercializam.

3.5 Análise macrográfica

Para a comparação visual entre as várias fresas foram registadas imagens das mesmas, recorrendo a uma câmara digital acoplada a um microscópio óptico *OLYMPUS SZH*.

No 1º conjunto foram registadas imagens das faces de topo (*Top*), apenas com o objectivo de comparar a geometria das fresas de um modo geral, pois durante a fase de ensaios em ambiente real a geometria de construção das fresas é constante. As figuras 3.20 a 3.24 mostram imagens das faces topo das fresas, sendo de destacar a fresa da Frezite que tem uma configuração diferente na zona central da face *Top*.

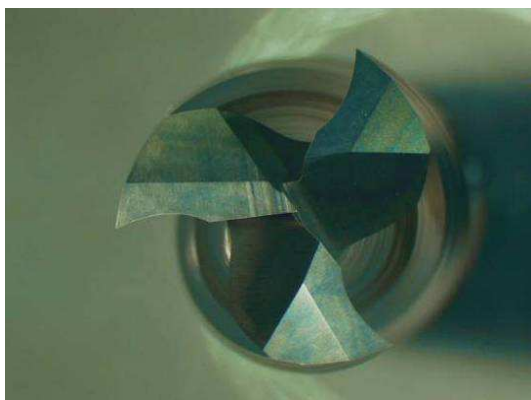


Figura 3-20 Face *Top* Frezite

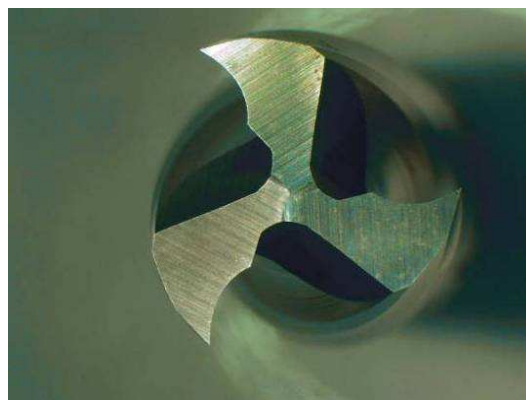


Figura 3-21 Face *Top* Leuco

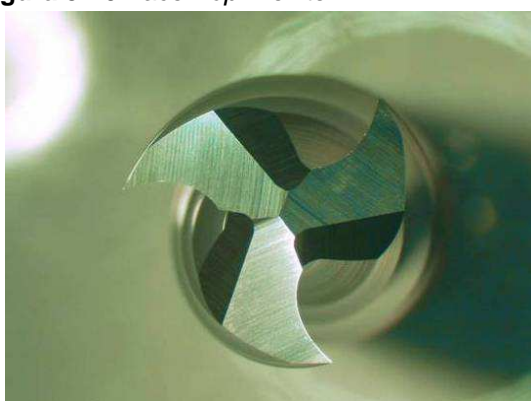


Figura 3-22 Face *Top* Oertli

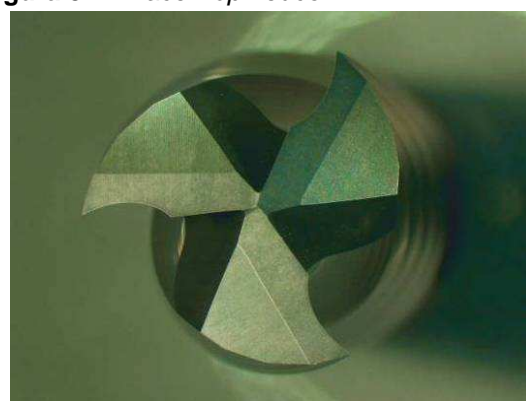


Figura 3-23 Face *Top* Leitz

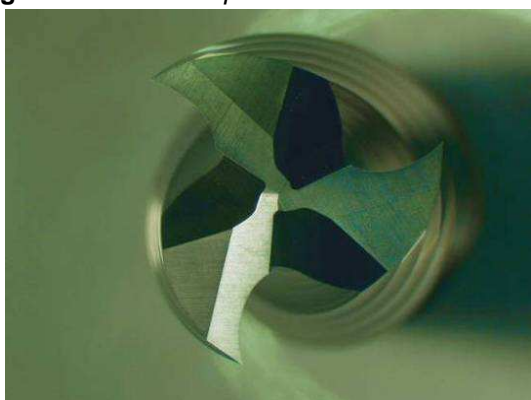


Figura 3-24 Face *Top* JSO

Das fresas a ensaiar em ambiente real, 3º conjunto (Frezite, CTS(KCR)06 e Sinter-Sud), foram registadas imagens de várias perspectivas com a finalidade de efectuar uma análise comparativa entre as várias etapas de desgaste, aquando da execução dos testes a realizar em ambiente de trabalho (ponto 3.6.2).

3.6 Testes em ambiente real

Os testes em ambiente real foram efectuados na empresa Vicaima, em Vale de Cambra, que tem como actividade primordial o fabrico de portas. Os testes tiveram por base a realização de aberturas em portas e desenvolveram-se em 3 etapas com o propósito de avaliar a evolução do desgaste nas fresas e comparar o comportamento das mesmas durante a maquinação. Tal como já referido anteriormente, as fresas que foram sujeitas aos ensaios em ambiente real foram a Frezite, a CTS(KCR)06 e a Sinter-Sud.

De seguida é feita uma descrição das várias etapas, com referência aos parâmetros de corte utilizados e ao material maquinado. Em cada etapa as variáveis referidas atrás foram mantidas constantes para as 3 fresas. Tal como já referido atrás, a geometria de construção de todas as fresas é semelhante, o que elimina este factor da análise. Na figura 3-25 pode-se observar a máquina utilizada para os ensaios em operação com uma das ferramentas em análise.

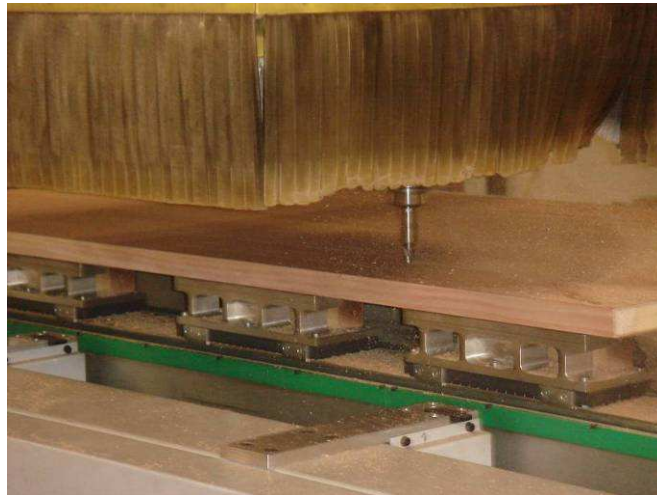


Figura 3-25 Ferramenta alvo de estudo em operação de corte

O aglomerado de madeira utilizado nas portas maquinadas é constituído por um núcleo de aglomerado de partículas e nas duas faces por uma camada de MDF revestido por folha de madeira. A configuração do aglomerado utilizado foi semelhante nas 2 primeiras etapas (ver tabela 3-8), na terceira etapa a densidade do aglomerado de partículas e a espessura da camada de MDF sofreram alterações.

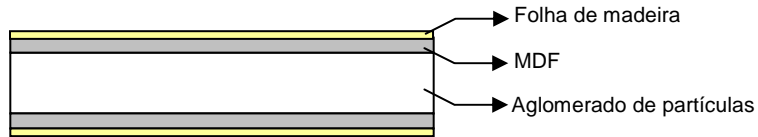


Figure 3-26 Esquema da estrutura do aglomerado utilizado

Tabela 3-8 Constituição dos aglomerados de madeira maquinados

	Aglomerado de partículas		MDF	Folha de Madeira
	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)	Espessura (mm)
Etapa 1	28,0	280-300	3,0	0,5
Etapa 2	28,0	280-300	3,0	0,5
Etapa 3	28,0	350-380	5,0	0,5

Os parâmetros de corte nas 2 primeiras etapas foram idênticos, no entanto, na terceira etapa como resultado da espessura superior de MDF e do aumento da densidade do aglomerado de partículas, o avanço e a profundidade de corte foram alterados, apresentando valores inferiores.



Figura 3-27 Aglomerados utilizados nos testes. Cima-3ª etapa; Baixo-1ª e 2ª etapa

O corte na terceira etapa foi realizado em duas fases, com a primeira fase de corte a ser realizada até ao centro do aglomerado. As temperaturas desenvolvidas no operação de corte na 3ª etapa

justificam este procedimento. Foram registados valores de temperatura, imediatamente após o corte, de cerca de 150°C.

As figuras 3-28 e 3-29 mostram um pormenor a região de entrada da fresa na placa.

Tabela 3-9 Parâmetros de corte, distância e tempo efectivo de corte

	Vel. da fresa (rpm)	Avanço (m/min)	Profundidade de corte (mm)	Distância total de corte (mm)	Tempo efectivo de corte (min)
Etapa 1	18.000	14,0	35,0	79800	5:42
Etapa 2	18.000	14,0	35,0	83820	6:00
Etapa 3	18.000	5,0	17,5	40000	8:00
			Total	203620	19:42



Figuras 3-28 e 3-29 Pormenor da zona de entrada da fresa na placa

3.6.1 Medição de rugosidades

Um dos parâmetros medidos entre etapas foi a rugosidade, com o objectivo de detectar alterações no estado superficial das fresas à medida que o tempo de utilização foi aumentando. Os gráficos seguintes ilustram os resultados obtidos para as faces *Top* (gráficos 3-16 a 3-18), *Up* (gráficos 3-19 a 3-21) e *Down* (gráficos 3-22 a 3-24).

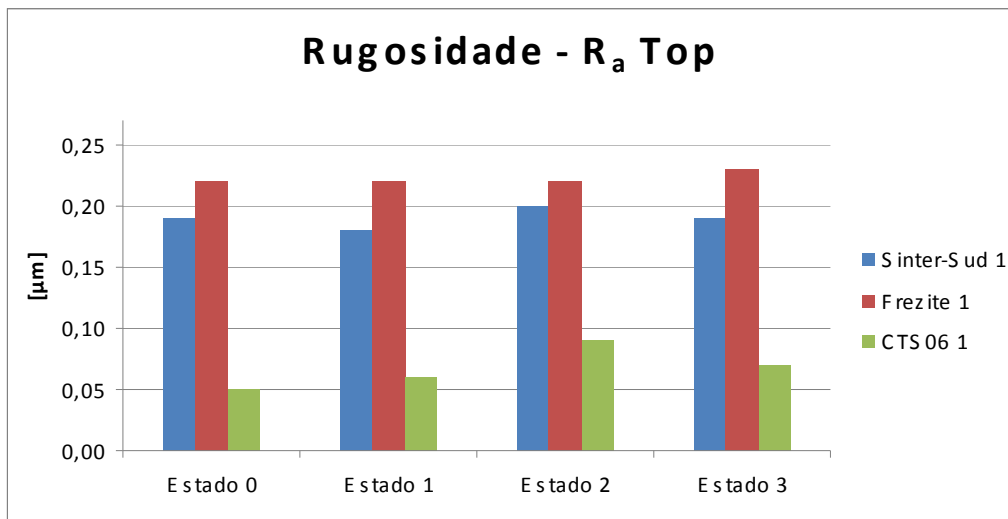


Gráfico 3-16 Evolução do parâmetro de rugosidade R_a na face *Top*

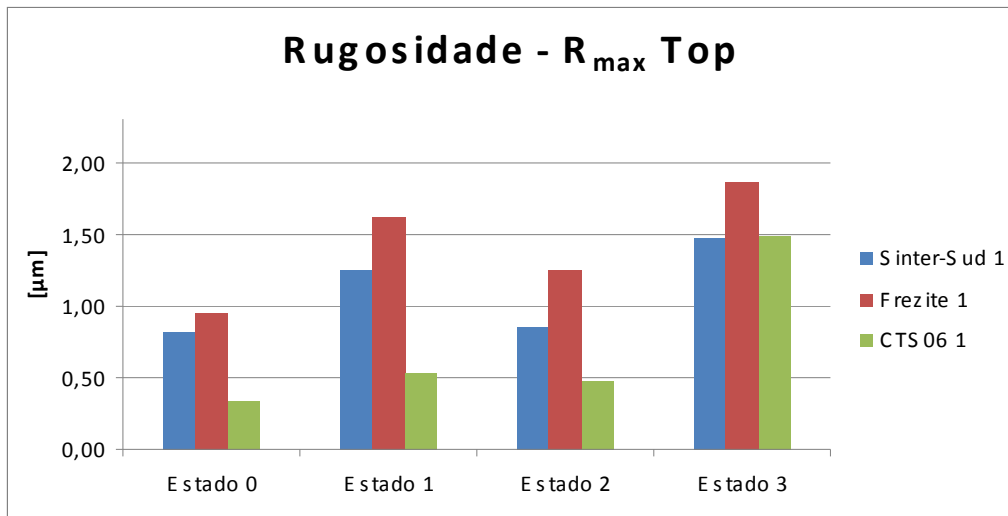


Gráfico 3-17 Evolução do parâmetro de rugosidade R_{max} na face *Top*

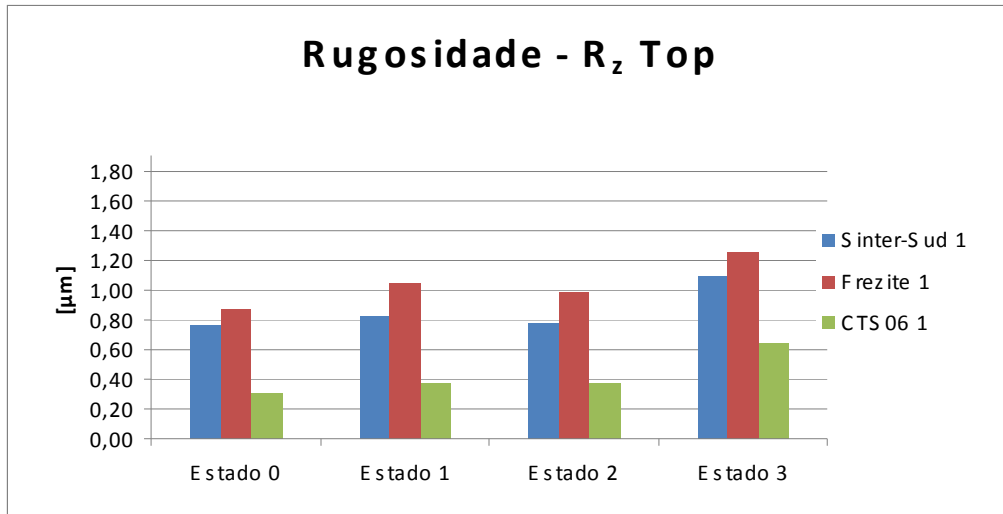


Gráfico 3-18 Evolução do parâmetro de rugosidade R_z na face *Top*

O parâmetro R_a para a face *Top* mantém-se constante ao longo das 3 etapas dos testes, não se verificando alterações significativas.

No parâmetro R_{max} há um aumento para as 3 fresas na passagem do estado 0 ao estado 1, seguida de uma diminuição na etapa 2. Este comportamento tem menor significado na fresa CTS(KCR)06. A etapa 3 revela um aumento neste parâmetro para as três fresas, com particular evidência para a fresa CTS(KCR)06, que sofre o maior aumento na passagem da etapa 2 para a etapa 3.

O parâmetro R_z mantém-se constante nas 2 primeiras etapas, registrando-se um aumento idêntico nas três fresas na passagem do estado 2 para o estado 3.

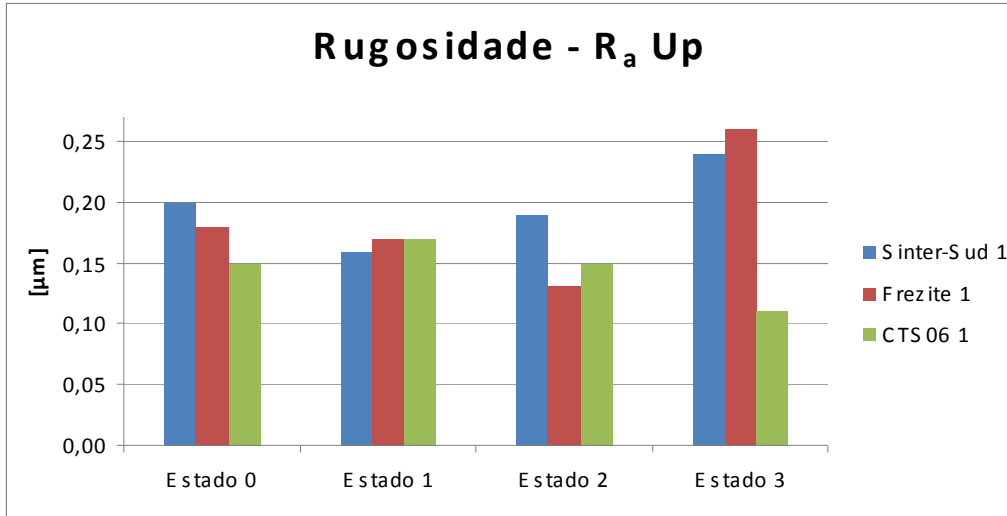


Gráfico 3-19 Evolução do parâmetro de rugosidade R_a na face *Up*

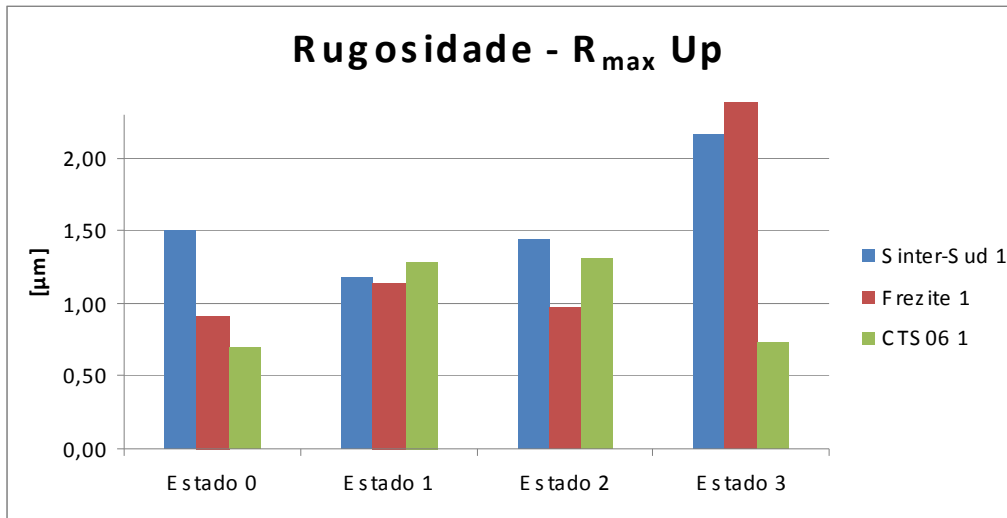


Gráfico 3-20 Evolução do parâmetro de rugosidade R_{max} na face *Up*

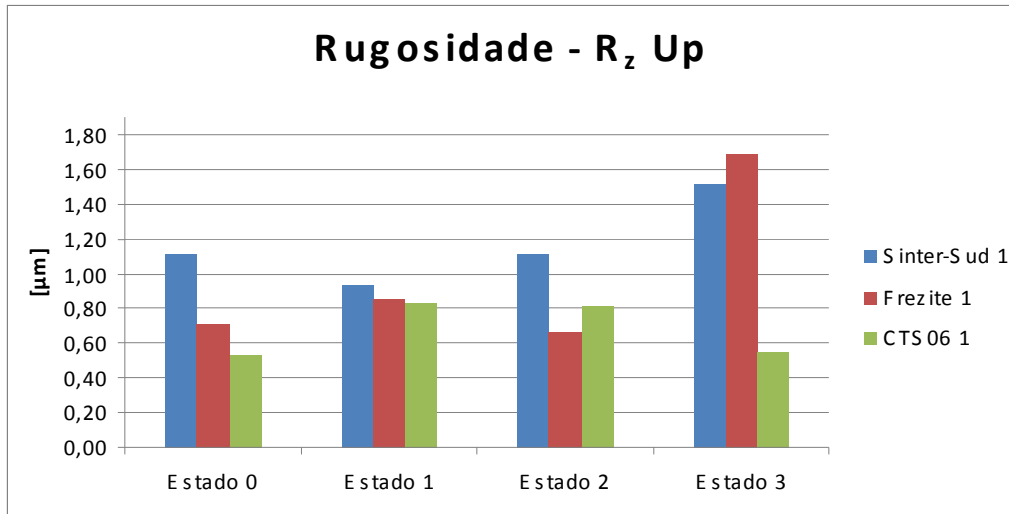


Gráfico 3-21 Evolução do parâmetro de rugosidade R_z na face *Up*

O parâmetro R_a para a face *Up* da fresa Sinter-Sud sofre um decréscimo na passagem do estado 0 ao estado 1, demonstrando depois um aumento progressivo, com um aumento mais significativo entre a etapa 2 e a etapa 3. Para a fresa Frezite o mesmo parâmetro tem um comportamento no sentido descendente até ao estado 2, com um aumento expressivo na passagem do estado 2 para o estado 3. A fresa CTS(KCR)06 mantém o parâmetro R_a praticamente constante até ao estado 2, exibindo um decréscimo no seu valor na passagem para o estado 3.

Para o parâmetro R_{max} a fresa Sinter-Sud, tal como para o parâmetro R_a, apresenta um decréscimo do estado 0 para o estado 1, demonstrando depois um comportamento ascendente, com mais significado na passagem do estado 2 ao estado 3. A fresa da Frezite tem um comportamento praticamente constante até ao estado 2, com um ligeiro aumento entre o estado 0 e estado 1 e uma ligeira diminuição na passagem para o estado 2. O valor para R_{max} sofre depois um aumento relevante na passagem para o estado 3. A CTS(KCR)06 tem um aumento progressivo no R_{max} até ao estado 2 com uma diminuição no estado 3.

O parâmetro R_z tem um evolução semelhante ao constatado para o R_{max} nas três fresas, com maior relevo na passagem do estado 2 para o estado 3 para o aumento mais significativo das fresas Frezite e Sinter-Sud e com a diminuição verificada na CTS(KCR)06.

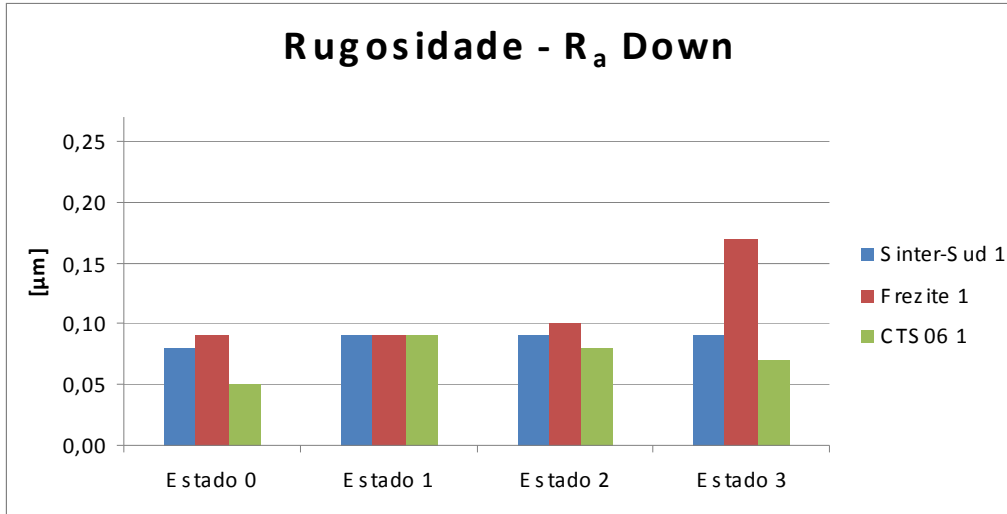


Gráfico 3-22 Evolução do parâmetro de rugosidade R_a na face *Down*

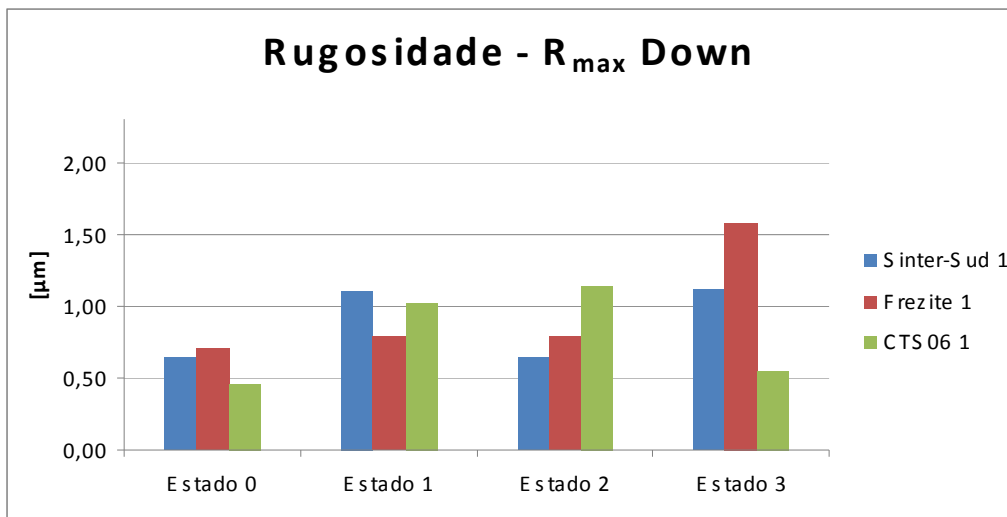


Gráfico 3-23 Evolução do parâmetro de rugosidade R_{max} na face *Down*

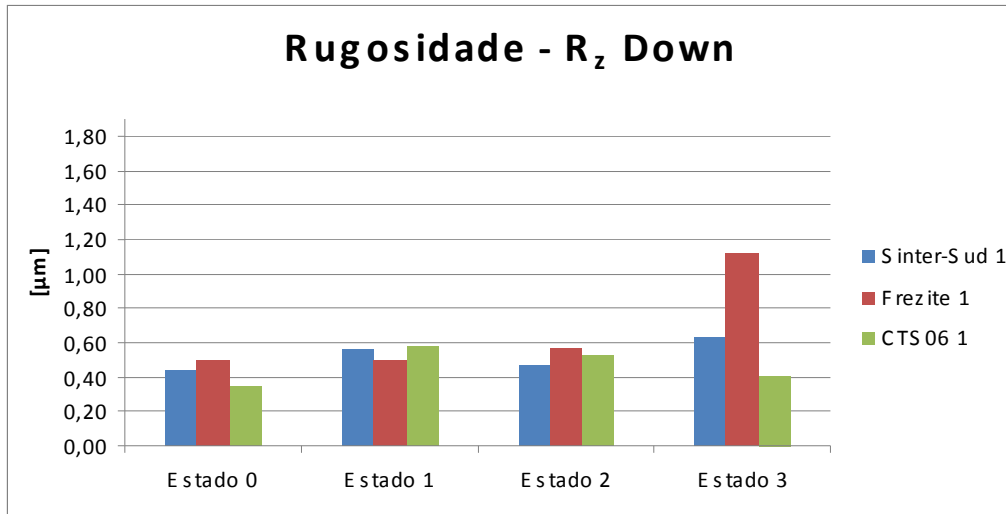


Gráfico 3-24 Evolução do parâmetro de rugosidade R_z na face *Down*

Na face *Down* o parâmetro R_a mantém-se praticamente constante na fresa Sinter-Sud. Na fresa CTS(KCR)06 de referir um aumento entre o estado 0 e o estado 1 e um ligeiro decréscimo entre o estado 2 e 3. A fresa da Frezite exhibe um aumento importante na passagem para o estado 3.

A fresa da Frezite tem valores constantes para R_{max} até ao estado 2, registando um aumento no estado 3. A Sinter-Sud tem valores semelhantes para o estado 0 e 2 e para o estado 1 e 3. A CTS(KCR)06 tem um desempenho ascendente nos 3 primeiros estados, registando uma diminuição no estado 3.

O parâmetro R_z , de um modo geral, é praticamente constante para as fresas Sinter-Sud e CTS(KCR)06. Apenas a fresa da Frezite sofre um aumento com relevância entre o estado 2 e o estado 3.

3.6.2 Análise macrográfica

Tal como referido atrás, foram registadas várias imagens com recurso a uma câmara digital acoplada a um microscópio óptico *OLYMPUS SZH*, com o objectivo de registar a evolução do desgaste nas fresas. De seguida (figuras 3-30 a 3-33) são apresentadas imagens com pormenores onde é possível observar com mais evidência o desgaste nas fresas.

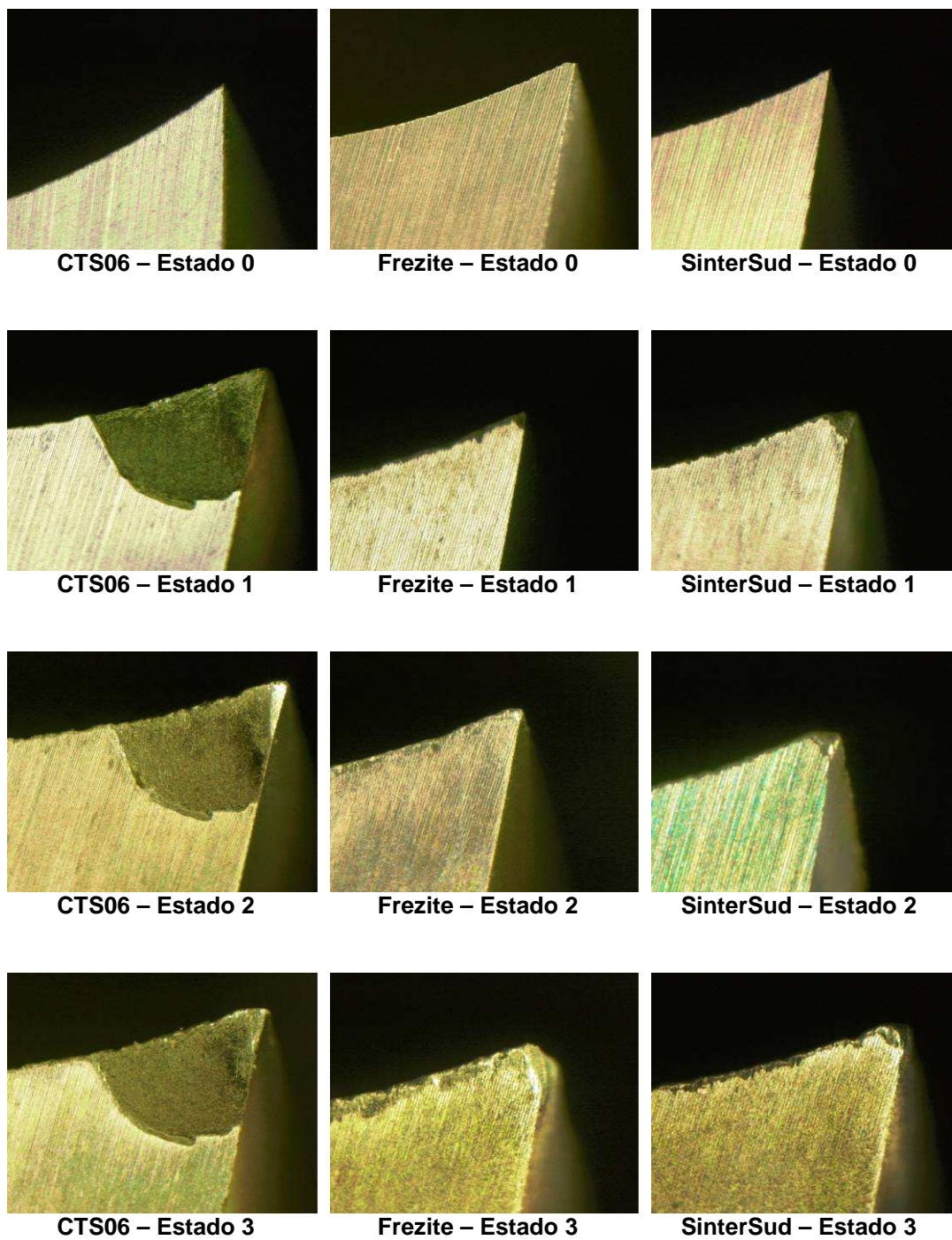


Figura 3-30 Pormenor na face *Top* para os 3 estados

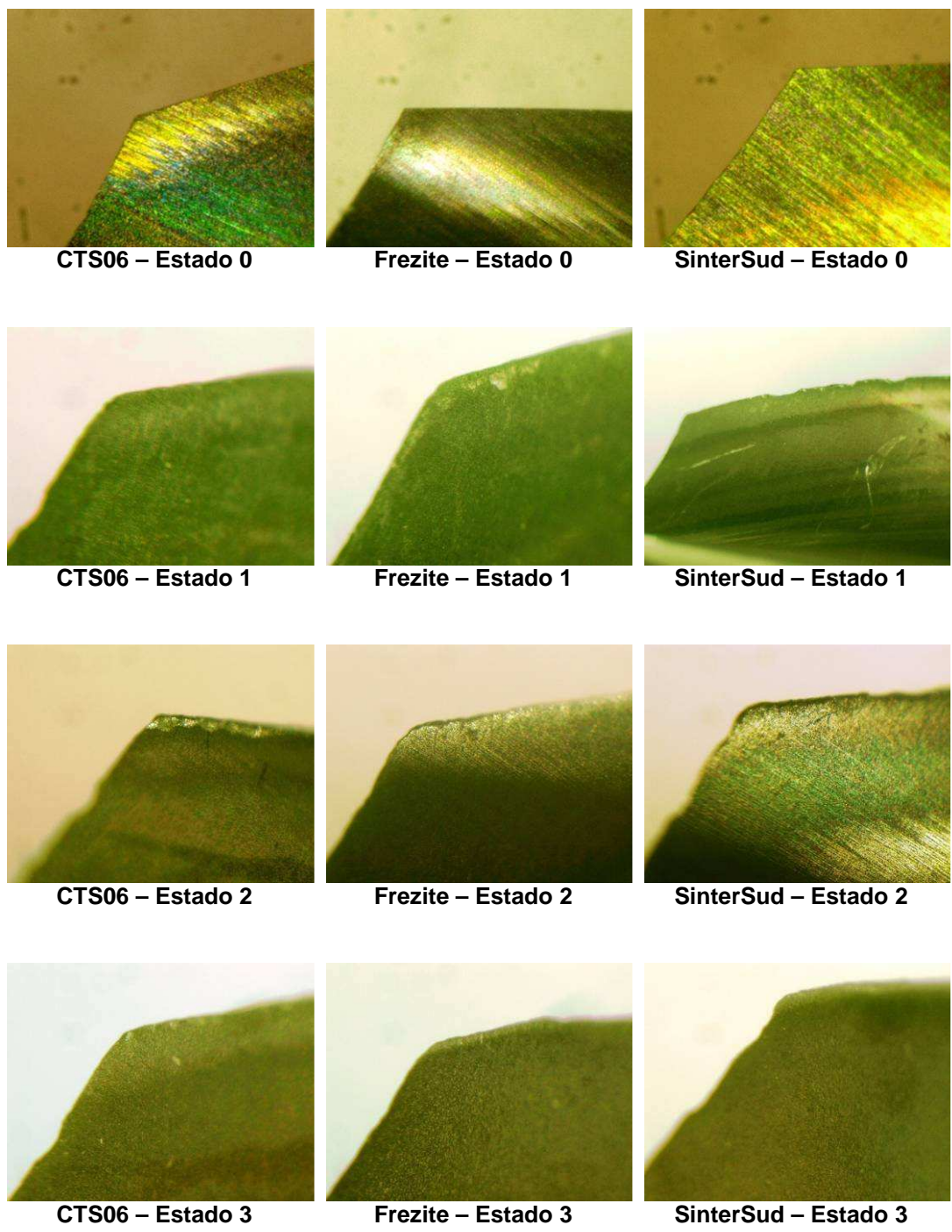


Figura 3-31 Pormenor na face Up para os 3 estados

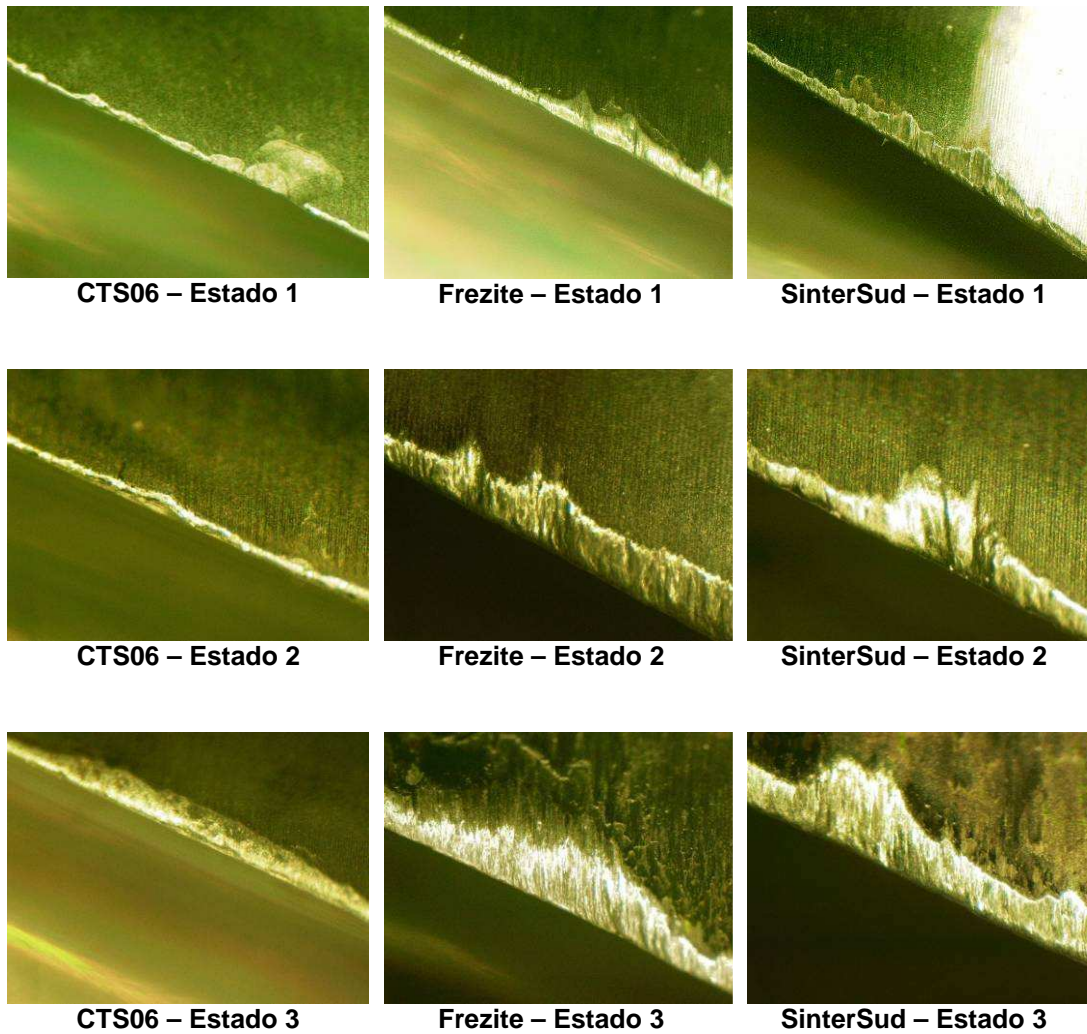


Figura 3-32 Pormenor na face *Up* para os 3 estados

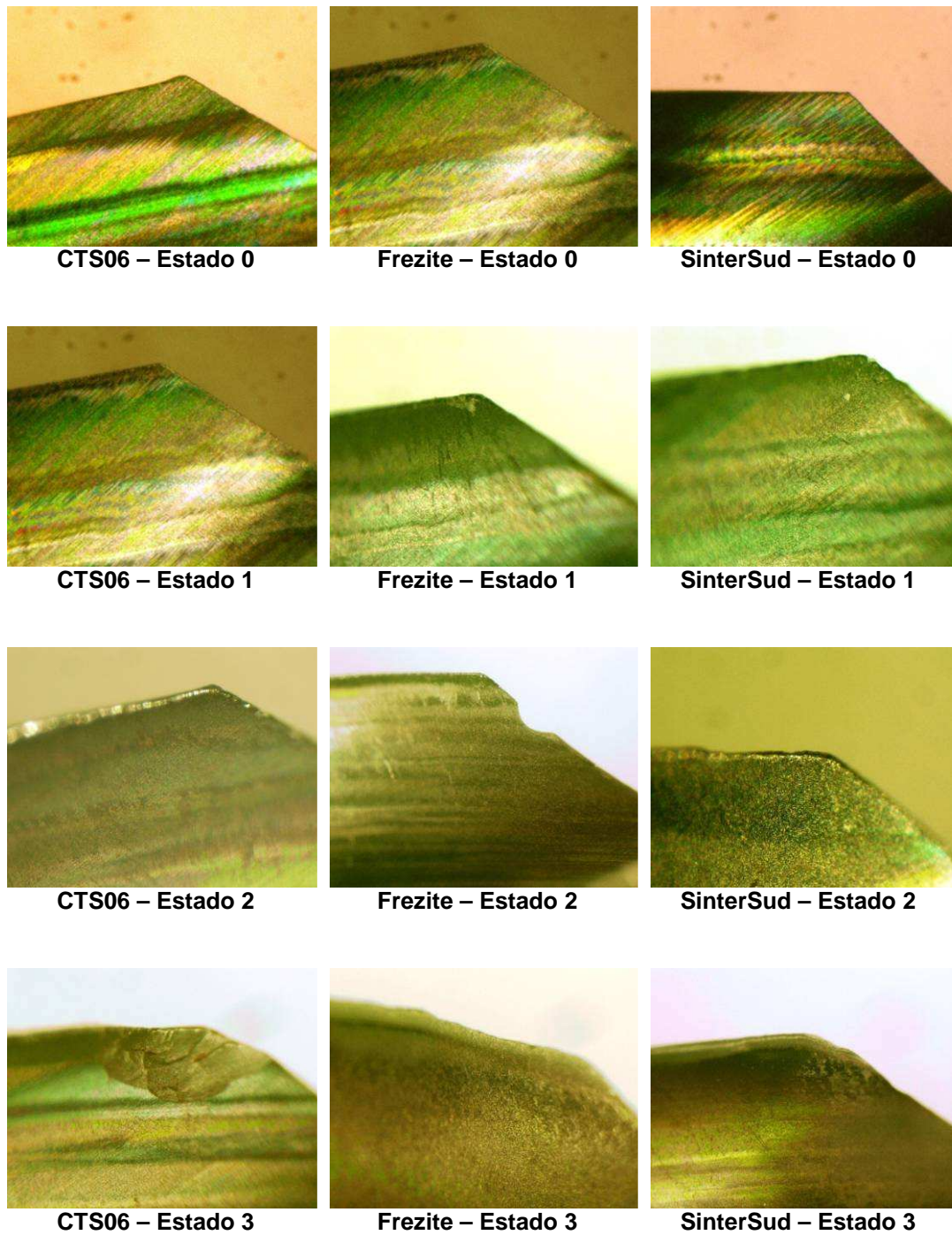


Figura 3-33 Pormenor na face *Down* para os 3 estados

Após a análise das imagens anteriores pode-se observar na face *Top* um desgaste progressivo com o arredondamento da aresta nas fresas Frezite e Sinter-Sud. Na fresa CTS(KCR)06 destaca-se o arrancamento de material verificado no estado 1. Este arrancamento poderá estar relacionado com a constituição do aglomerado de partículas, que não raras vezes apresenta na sua constituição materiais metálicos, plásticos ou pedra. Este factor pode determinar a retirada de serviço de ferramentas com pouco tempo de trabalho efectivo. Na figura 3-34 pode-se observar material metálico no interior do aglomerado de partículas, que foi detectado no decorrer dos ensaios realizados.



Figura 3-34 Material metálico detectado no aglomerado de partículas

Na figura 3-32 pode-se observar claramente a diferença de comportamento entre as 3 fresas. É visível de forma inequívoca o desempenho superior da fresa CTS(KCR)06. Na mesma figura vê-se novamente um arrancamento de material na fresa CTS(KCR)06 tal como nas imagens para a face *Down*. Nas imagens para o estado 2 e 3 das fresas Frezite e Sinter-Sud da figura 3-32 são perceptíveis, além do desgaste mais acentuado, marcas de sobreaquecimento. Comparativamente, a fresa da Frezite encontra-se num estado de deterioração inferior ao exibido pela fresa Sinter-Sud.

4. Conclusões

Com base nos resultados dos ensaios desenvolvidos no decurso do projecto foi possível obter algumas conclusões.

- Com os valores obtidos para a área de grão, a percentagem de cobalto e a dureza foram estabelecidas relações entre estas variáveis que não revelaram resultados fora do esperado. Comprovou-se para as fresas ensaiadas que a dureza aumenta com a diminuição do tamanho de grão e com a diminuição da percentagem de cobalto. No entanto, esta relação linear não se verifica para a fresa CTS(KCR)06, que apesar de ter um valor para a área de grão superior às restantes, apresenta um dos valores mais elevados para a dureza, o que faz concluir que a influência da percentagem de cobalto na dureza é superior.

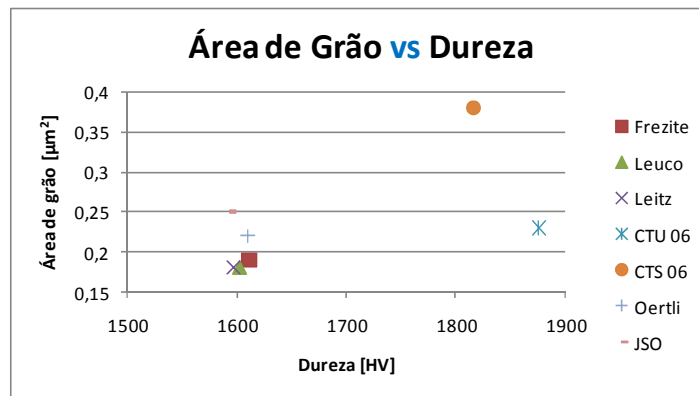


Gráfico 4-1 Área de grão vs Dureza

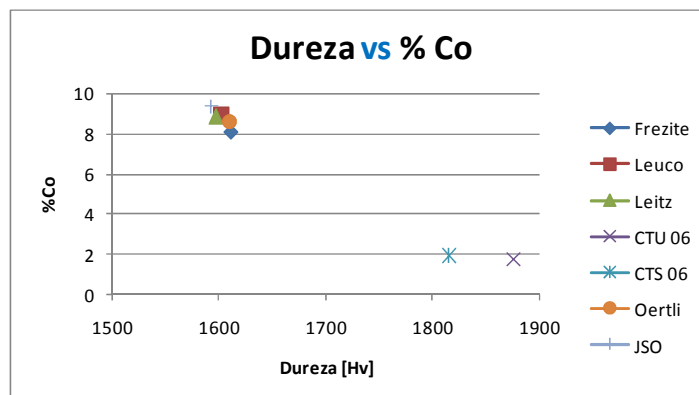


Gráfico 4-2 Dureza vs %Co

- O ensaio de desgaste comprovou que os materiais com dureza superior apresentam um melhor comportamento ao desgaste.

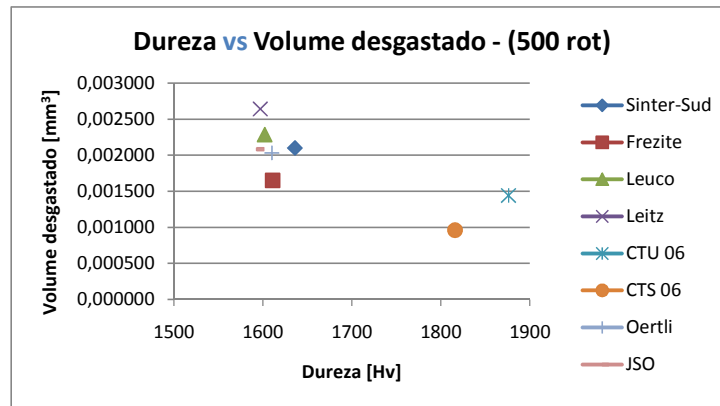


Gráfico 4-3 Dureza vs Volume desgastado (500 rotações)

- Os ensaios de desgaste por esfera rotativa com recurso a pó abrasivo revelaram resultados que se vieram a confirmar na fase posterior do estudo, durante a realização dos testes em trabalho real, isto apesar do material a maquinar ser duma natureza diferente do pó utilizado. Ou seja, a fresa CTS(KCR)06 é aquela que tem um melhor comportamento, seguida da Frezite.
- Pela análise visual da superfície das fresas é possível verificar que a superfície das fresas Frezite e Sinter-Sud têm marcas de sobreaquecimento superiores às registadas na fresa CTS(KCR)06, o que leva a considerar que as temperaturas desenvolvidas durante a operação de corte nesta fresa são inferiores. As imagens em pormenor no ponto 3.6.2 também demonstram esta situação de sobreaquecimento.

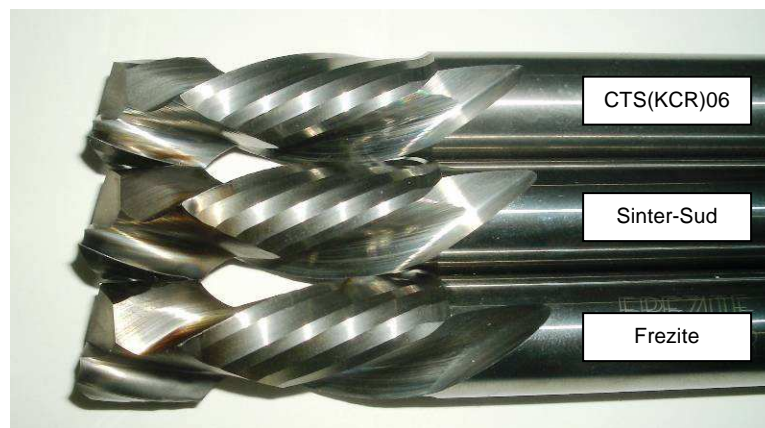


Figura 4-1 Sobreaquecimento na superfícies das 3 fresas

- Uma análise da evolução nos parâmetros de rugosidade revela, para as fresas Frezite e Sinter-Sud, a presença de um fase inicial de desgaste mais acentuado com o aumento da rugosidade, seguida de uma tendência na diminuição dos valores para a rugosidade, num eventual sentido de estabilização do estado superficial. Nestas duas fresas o estado 3 revela um aumento acentuado da rugosidade, resultado de um estado de desgaste mais severo. A fresa CTS(KCR)06 tem o mesmo comportamento inicial, no entanto no estado 3, ao contrário das restantes, ainda apresenta uma tendência decrescente no valor da rugosidade, evidenciando desta forma um menor desgaste superficial. Os valores no estado 3 para a Frezite são superiores aos verificados para a Sinter-Sud, no entanto, uma análise visual das fresas permite atestar que a fresa da Frezite se encontra em melhor estado.
- Em valor absoluto os valores para os parâmetros R_{max} e R_z na fresa CTS(KCR)06 são inferiores aos obtidos para as outras 2 fresas. Este facto, aponta para um menor número de crateras que resultam da remoção mecânica dos grãos de WC, consequência da remoção prévia do cobalto, revelando desta forma menor desgaste desta fresa.
- Apesar da diferença, no estado de desgaste, entre as fresas sujeitas aos ensaios em ambiente real, em todas foi verificada uma diminuição na qualidade de acabamento da superfície cortada, após cerca de 200 metros de corte e um tempo efectivo de utilização próximos dos 20 minutos.



Figura 4-2 Superfície de corte com imperfeições e sinais de sobreaquecimento.

- Apesar da fresa CTS(KCR)06 ter um melhor comportamento ao desgaste e apresentar um melhor estado superficial, não deixa de ser importante a circunstância de se terem registado vários arrancamentos de material na sua superfície que poderão ter sido causados por matéria indesejada no aglomerado de partículas. O facto deste material apresentar uma dureza elevada e expectavelmente possuir valores menos favoráveis para a tenacidade pode ter relação com os arrancamentos verificados.

5. Trabalhos futuros

- Determinação de outros parâmetros microestruturais, como a distância média do ligante;
- Determinação da tenacidade para os vários materiais;
- Medição das temperaturas verificadas nos ensaios em ambiente de trabalho real;
- Introdução de outras fresas nos testes em ambiente real.

6. Referências

- [1] **ASM Handbook Volume 16:** Machining. ASM International, 1995
- [2] **AB Sandvik Coromant:** Modern Metal Cutting – a practical handbook. AB Sandvik Coromant, Sanviken 1994
- [3] **ASM Handbook Volume 7:** Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 1998
- [4] **José M. G. de Carvalho Ferreira:** Tecnologia da Pulverometalurgia. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa 2002
- [5] **Gopal S. Upadhyaya:** Cemented Tungsten Carbides – Production, properties and testing. Noyes Publications, New Jersey 1998
- [6] **A. Upadhyaya; D. Sarathy; G. Wagner:** Advances in alloy design aspects of cemented carbides. Materials and Design 22 (511-517) 2001
- [7] **S. Okamoto; Y. Nakazono; K. Otsuka; T. Shimoitani; J. Takada:** Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain. Materials Characterization 55 (281-287) 2005
- [8] **ASTM Internacional:** E 112-96 - Standard test methods for determining average grain size (2004)
- [9] **R. Warren; M. B. Waldron:** Powder Met., vol.15, Nr.30 (166) 1972
- [10] **H. Engqvist; S. Jacobson; N. Axén:** A model for the hardness of cemented carbides. Wear 252 (384-393) 2002
- [11] **Y. Chaochen,:** Horizon in Powder Met., Verlag-Schmid, Freiburg, part I (289) 1986
- [12] **V. A. Tracy; N. R. V. Hall:** Powder. Met. Int., Vol. 12, No. 3 (132) 1980

- [13] **D. Moskowitz; M.J. Ford; M. Humenik:** Powder Met. Int., Vol. 6, No 4 (55) 1970
- [14] **L. Prakash:** Ph.D. Thesis, Universitat Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Report KfK 2984, 1981
- [15] **L. Zhonglin:** Horizon in Powder. Met., Verlag-Schmid, Freiburg, Part I (551) 1986
- [16] **Gopal S. Upadhyaya:** Materials science of cemented carbides – an overview. Materials and Design 22 (483-489) 2001
- [17] **J. A. M. Ferreira et al.:** A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals, Int J Refract Met (2008)
- [18] **D. Ferraresi,:** Fundamentos da Usinagem dos Metais. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo 1995
- [19] **J. P. Davim:** Princípios da Maquinagem. Livraria Almedina, Coimbra 1995
- [20] **L. Prakash:** Application of Fine Grained Tungsten Carbide Based Cemented Carbides. Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials 13 (257-264) 1995
- [21] **J. Y. Sheikh-Ahmad; J. A. Bailey:** The wear characteristics of some cemented tungsten carbides in machining particleboard. Wear 225-229 (256-266) 1999
- [22] **Forest Products Laboratory:** Wood Handbook – wood as an engineering material. US Department of Agriculture, Madison 1999
- [23] **J. S. Machado:** Placas de derivados de madeira – tipos de placas e sua especificação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 2005
- [24] **A. M. Baptista; J. Ferreira; N. Pinto:** Ensaios de microabrasão por esfera rotativa. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 1999
- [25] **A. M. Baptista:** Apontamentos de Engenharia de Superfícies. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 1997

7.Anexo

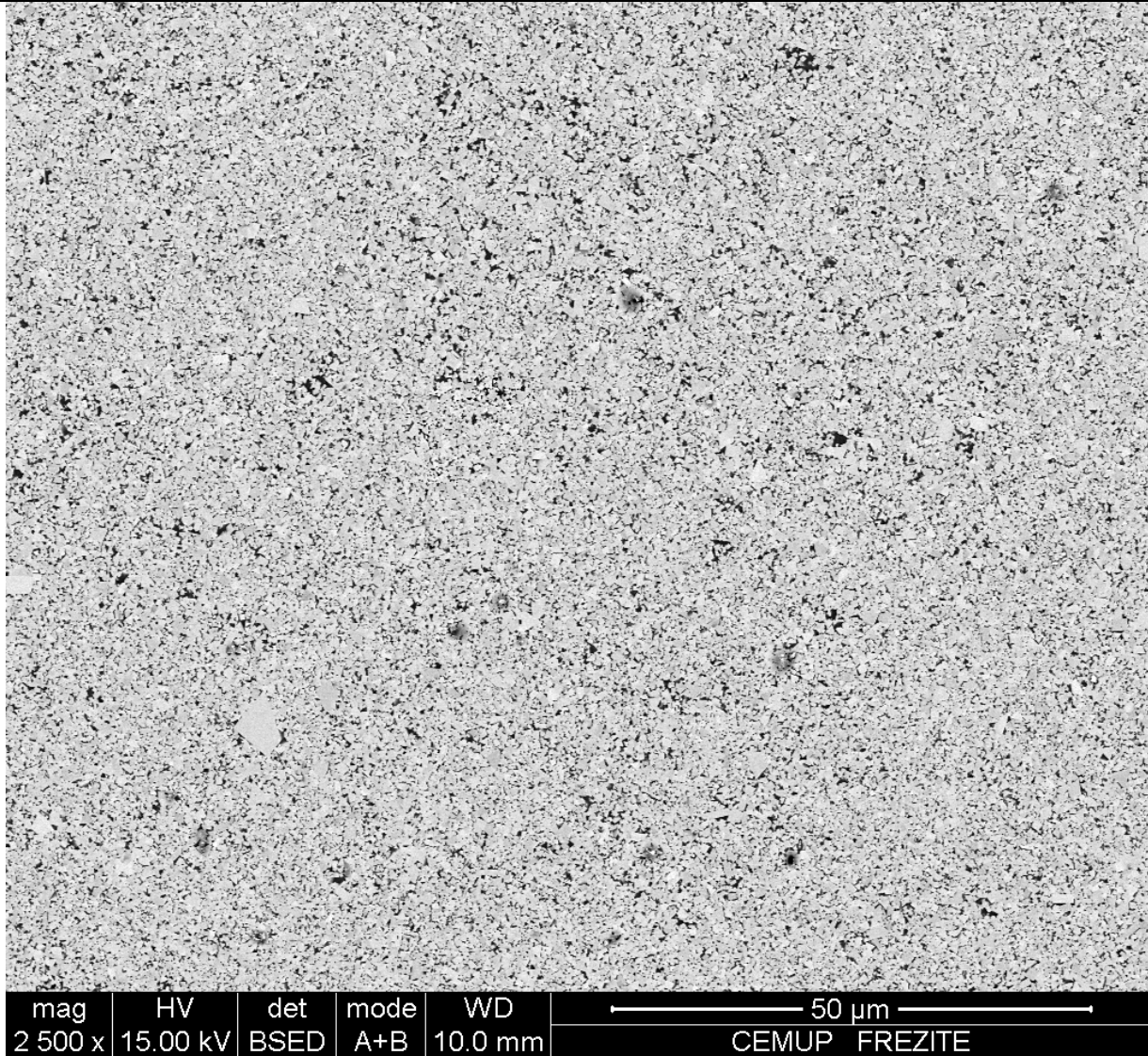
7.1 Equivalência entre escalas de dureza

Tabela 7-1 Equivalência entre escalas de dureza

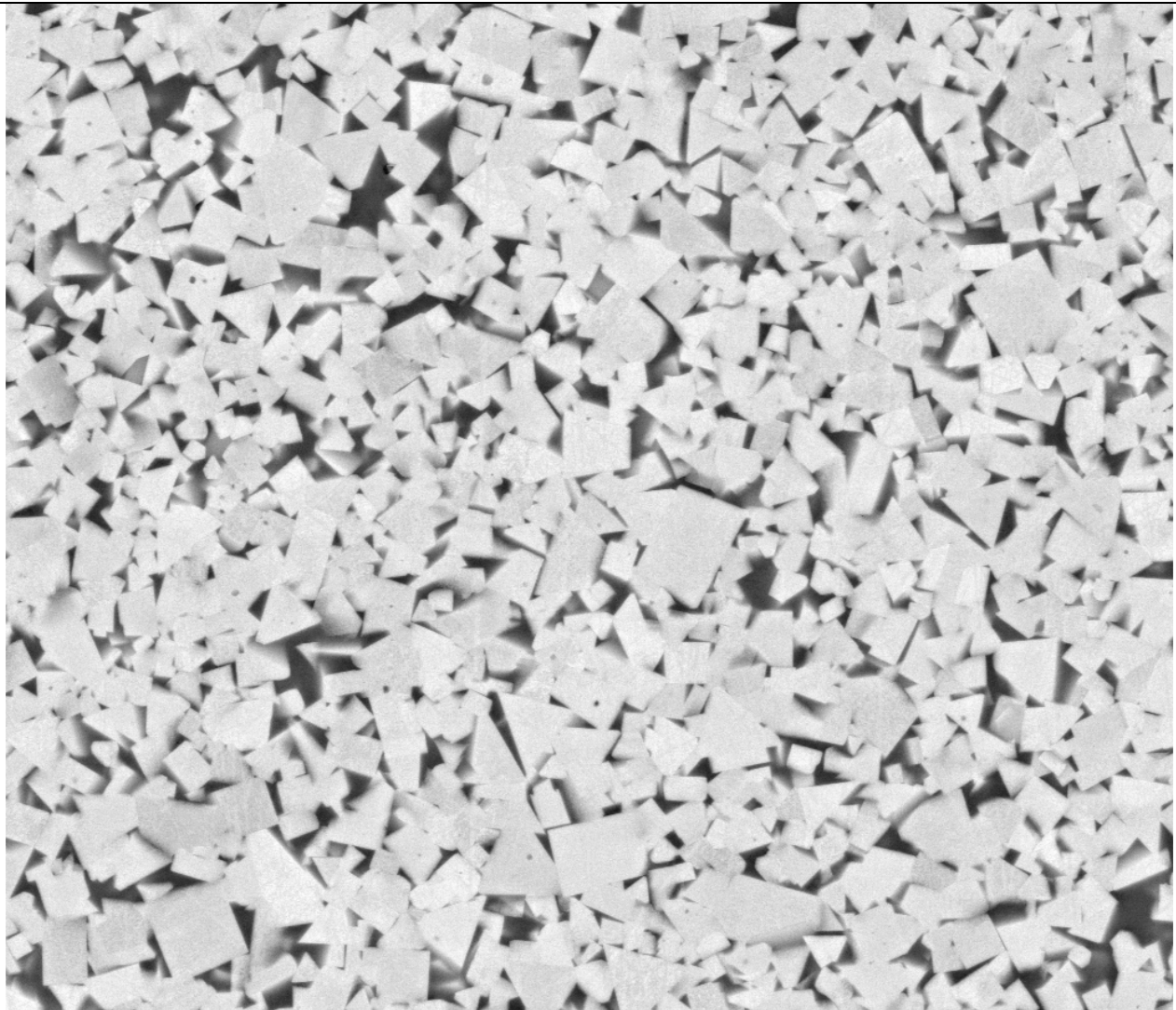
VICKERS HV10	ROCKWELL										BRINELL	
	A	B	C	D	15N	30N	45N	15T	30T	45T	BHN 500kg	BHN 3000kg
1865	92		80	87	97	92	87					
1787	92		79	86	96	92	87					
1710	91		78	85	96	91	86					
1633	91		77	84	96	91	85					
1556	90		76	83	96	90	84					
1478	90		75	83	95	89	83					
1400	89		74	82	95	89	82					
1323	89		73	81	95	88	81					
1245	88		72	80	95	87	80					
1160	87		71	80	94	87	79					
1076	87		70	79	94	86	78					
1004	86		69	78	94	85	77					
940	86		68	77	93	84	75					
900	85		67	76	93	84	74					
865	85		66	75	93	83	73					
832	84		65	75	92	82	72					739
800	84		64	74	92	81	71					722
772	83		63	73	91	80	70					705
746	83		62	72	91	79	69					688
720	82		61	72	91	79	68					670
697	81		60	71	90	78	67					654
674	81		59	70	90	77	66					634
653	80		58	69	89	76	64					615
633	80		57	69	89	75	63					595
613	79		56	68	88	74	62					577
595	79	120	55	67	88	73	61					560
577	78	120	54	66	87	72	60					543
560	78	119	53	65	87	71	59					523
544	77	119	52	65	86	70	57					512
528	77	118	51	64	86	69	56					496
513	76	117	50	63	86	69	55					481
498	75	117	49	62	85	68	54					469
484	75	116	48	61	85	67	53					455
471	74	116	47	61	84	66	51					443
458	74	115	46	60	84	65	50					432

7.2 Imagens registadas por microscopia electrónica de varrimento

Frezite

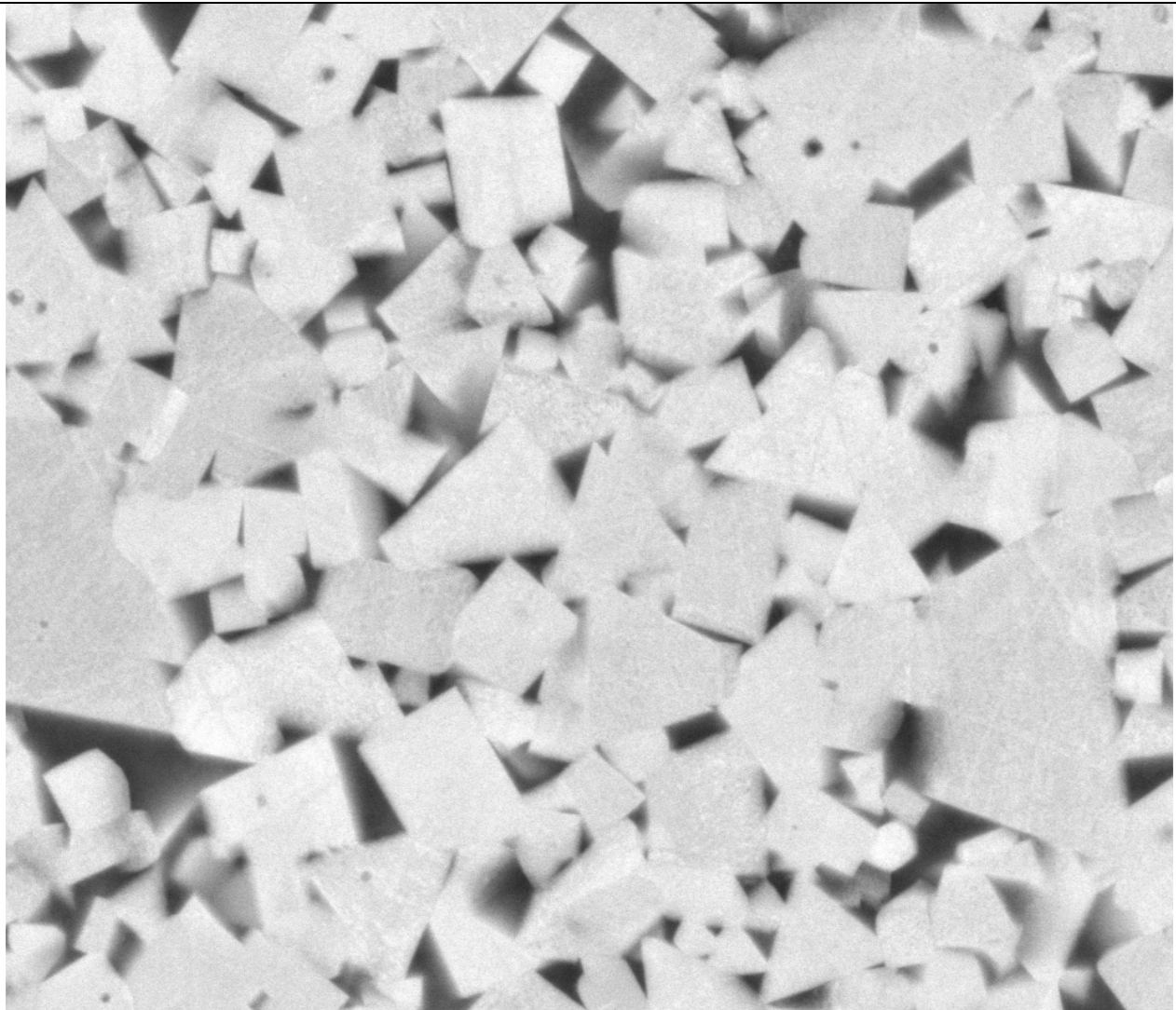


Frezite



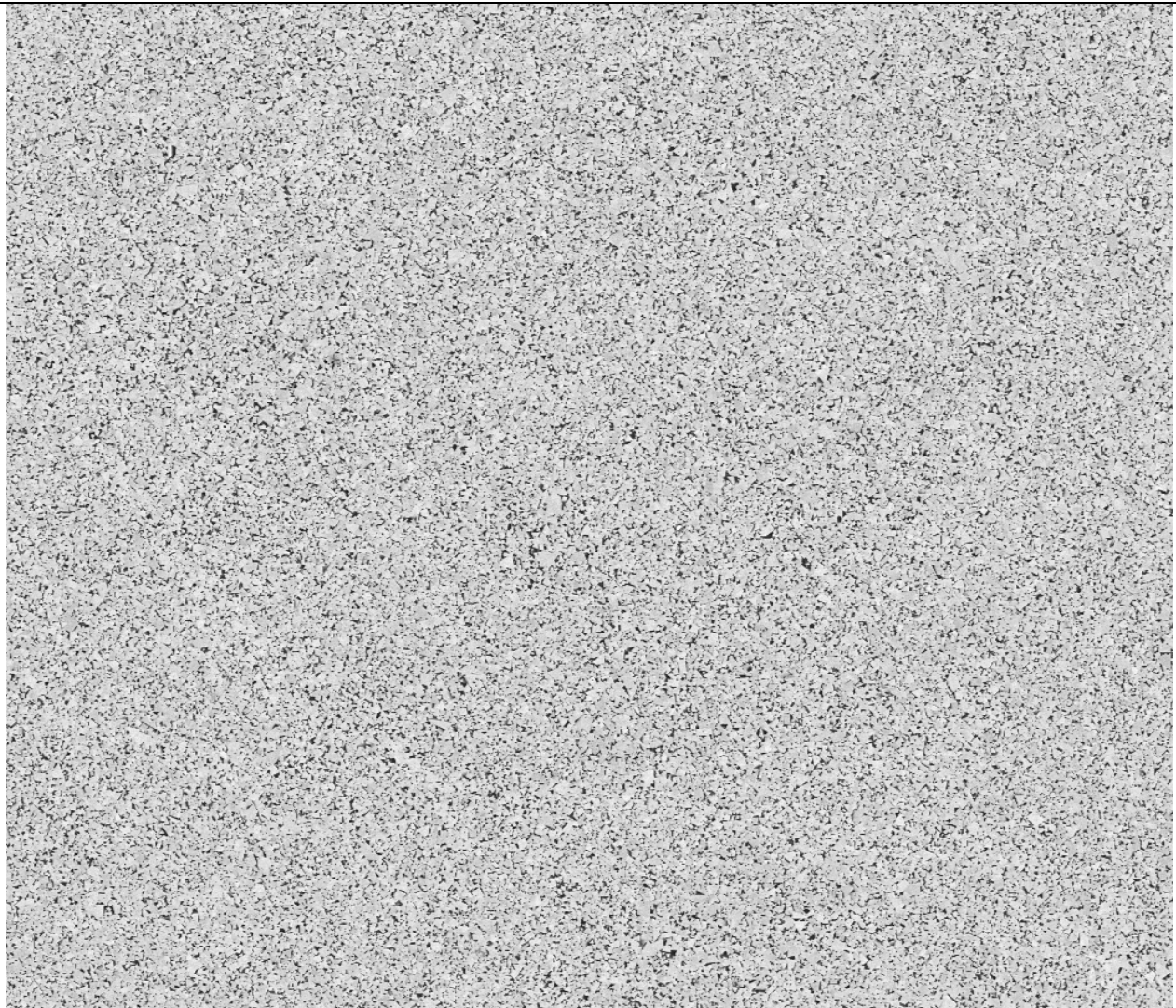
mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	10.2 mm	CEMUP FREZITE	

Frezite



mag	HV	det	mode	WD	2 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	12.2 mm	CEMUP FREZITE	

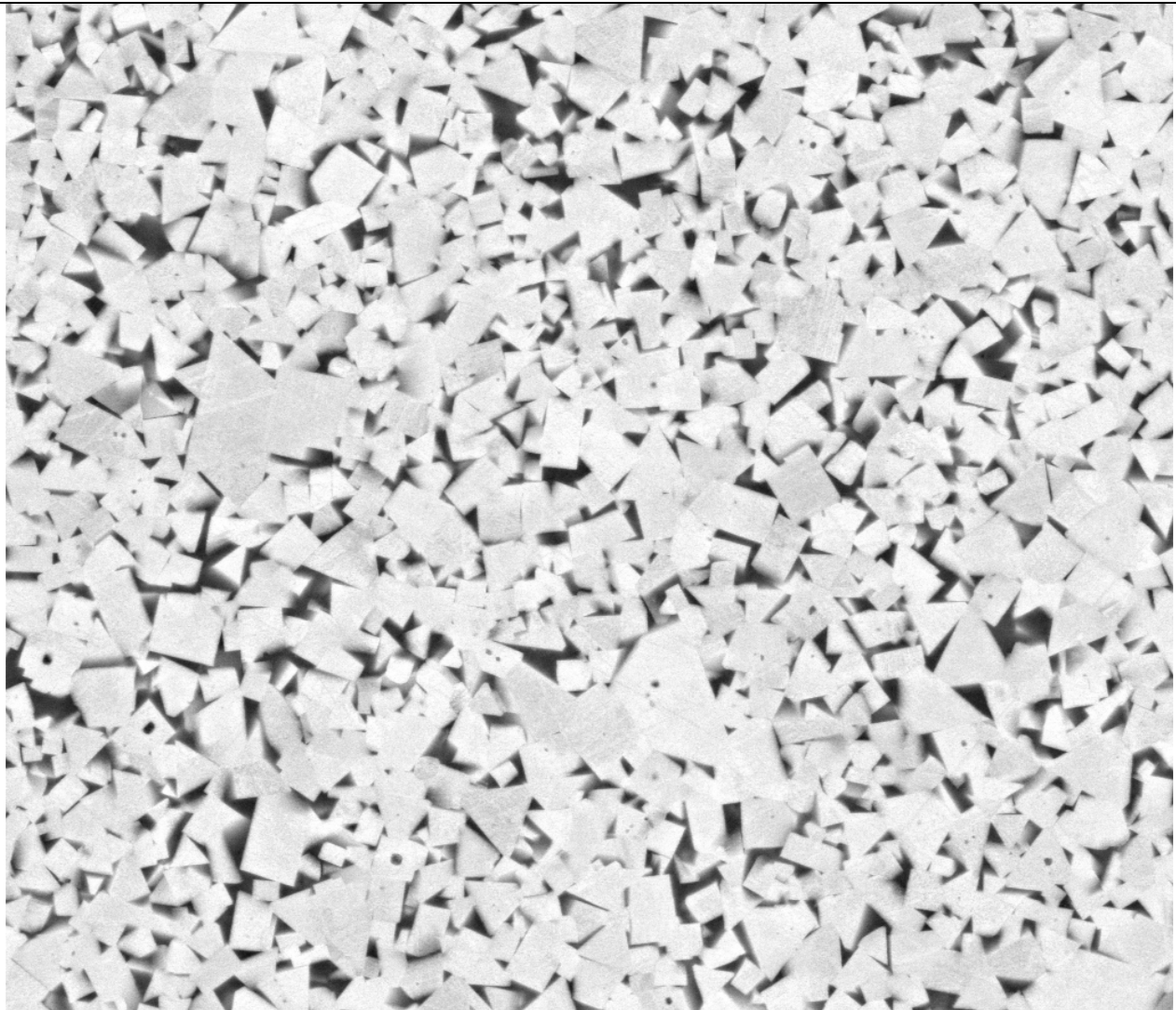
Leuco



mag	HV	det	mode	WD	50 μ m
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.7 mm	

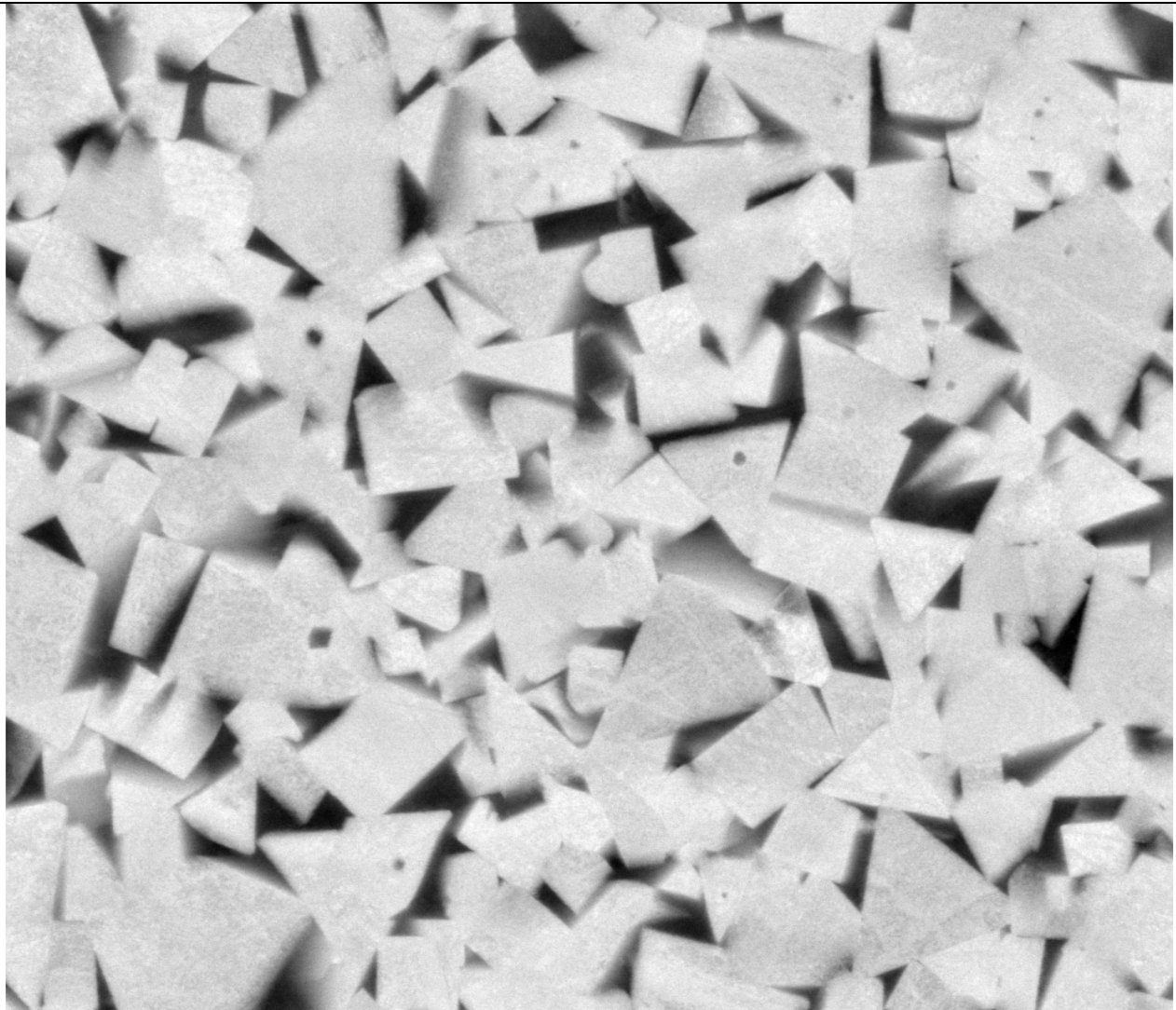
CEMUP LEUCO

Leuco

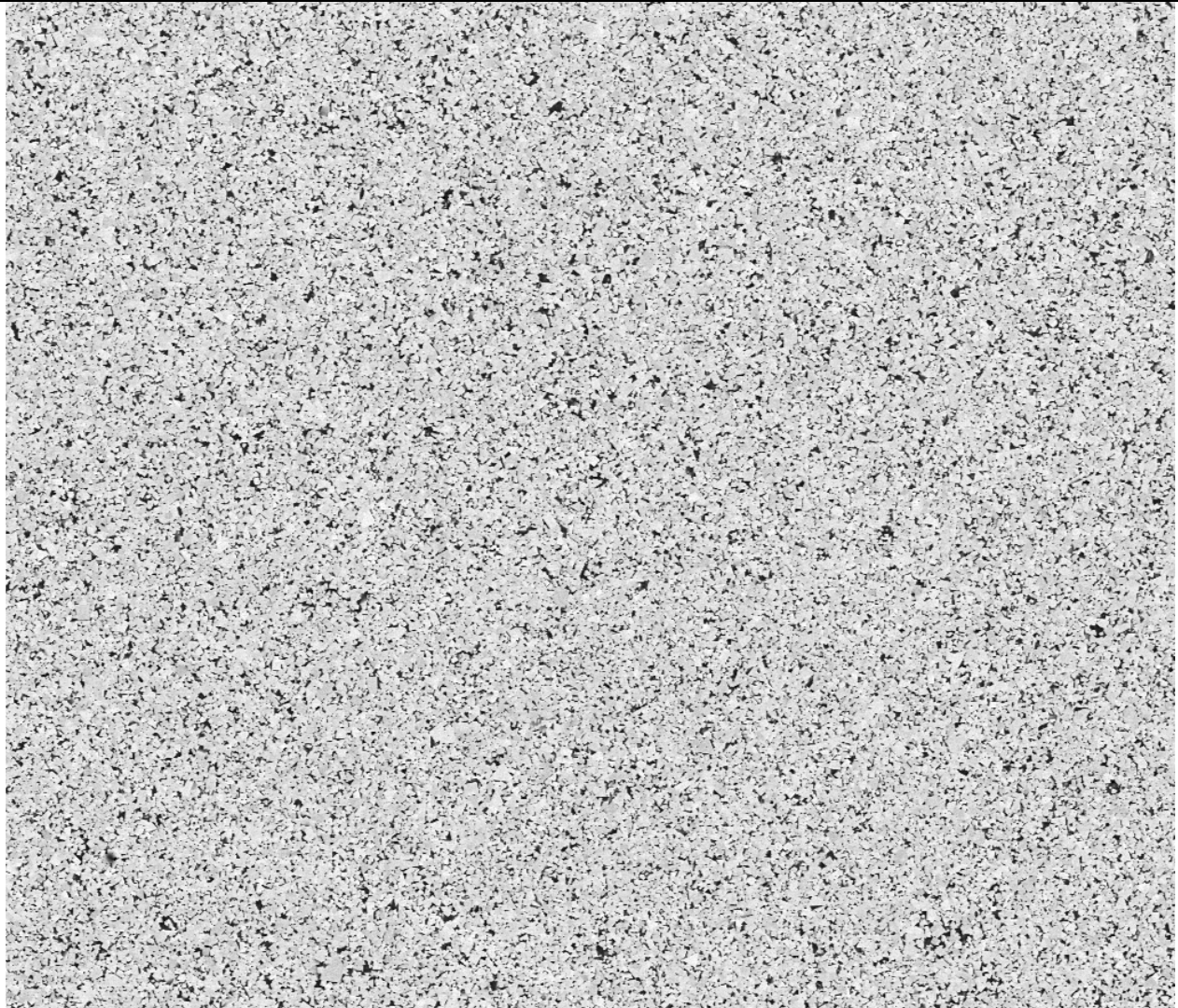


mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.7 mm	CEMUP LEUCO	

Leuco

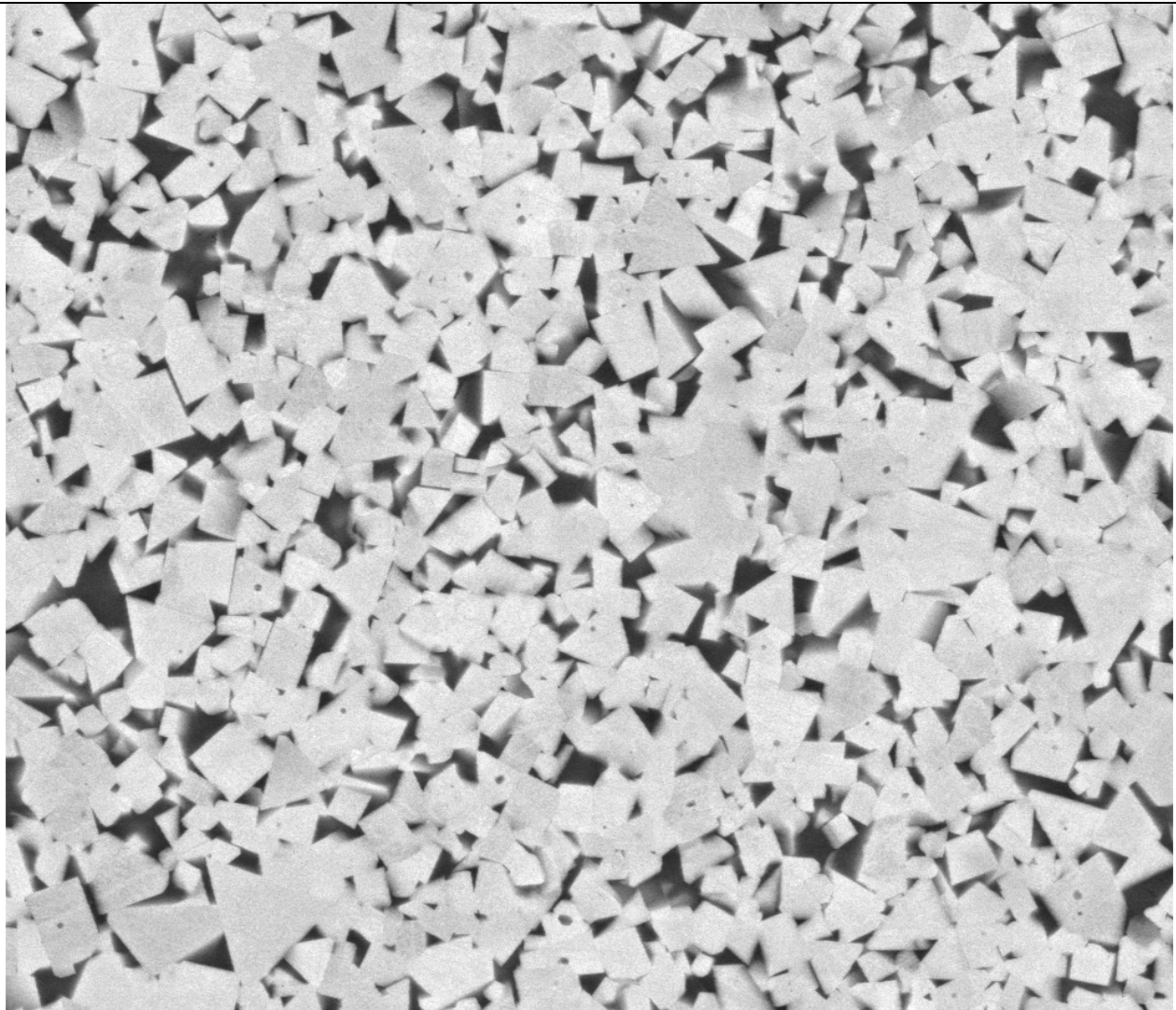


mag	HV	det	mode	WD	3 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.7 mm	CEMUP LEUCO	

Leitz

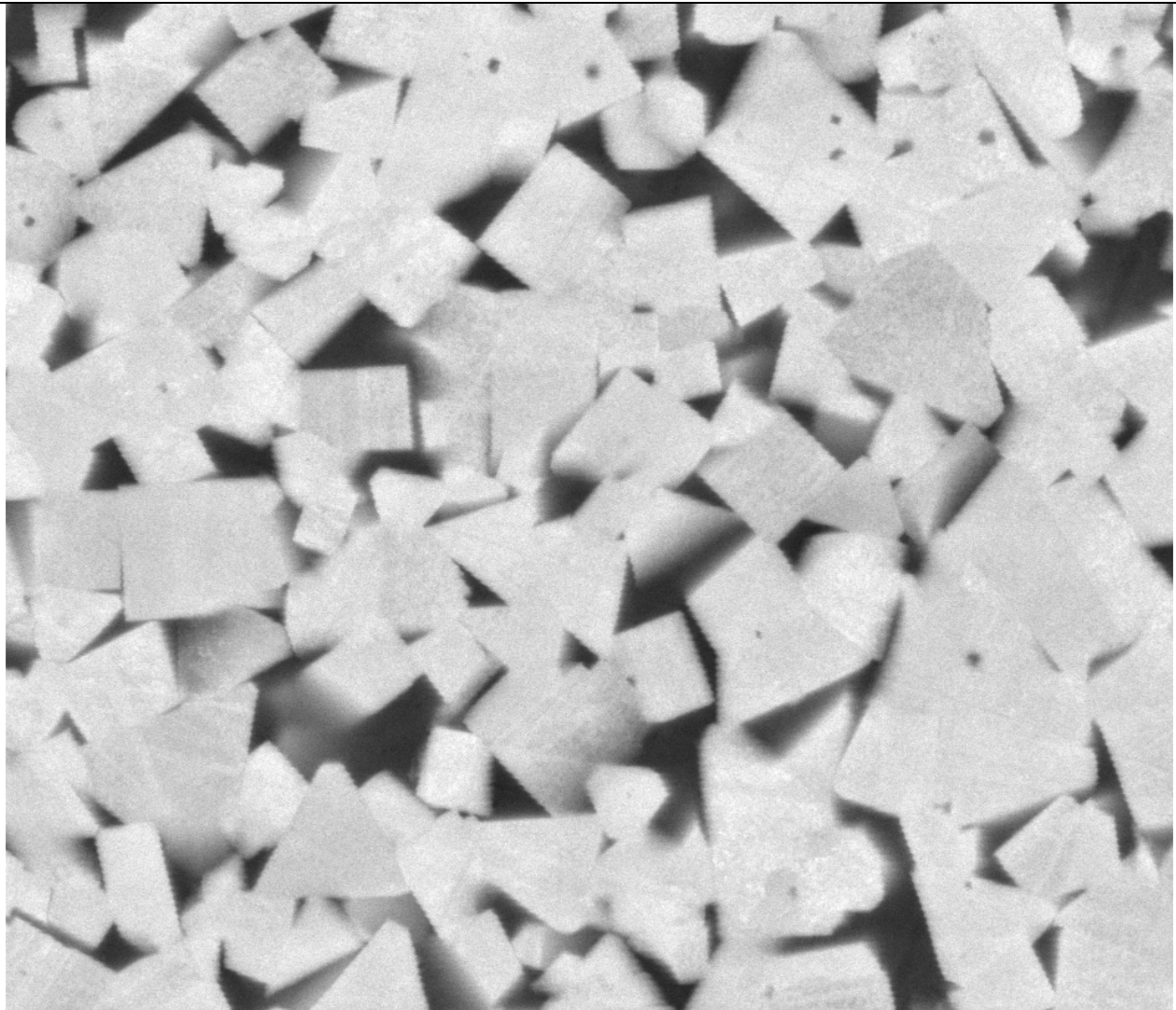
mag	HV	det	mode	WD	← 50 μm → CEMUP LEITZ
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	10.5 mm	

Leitz



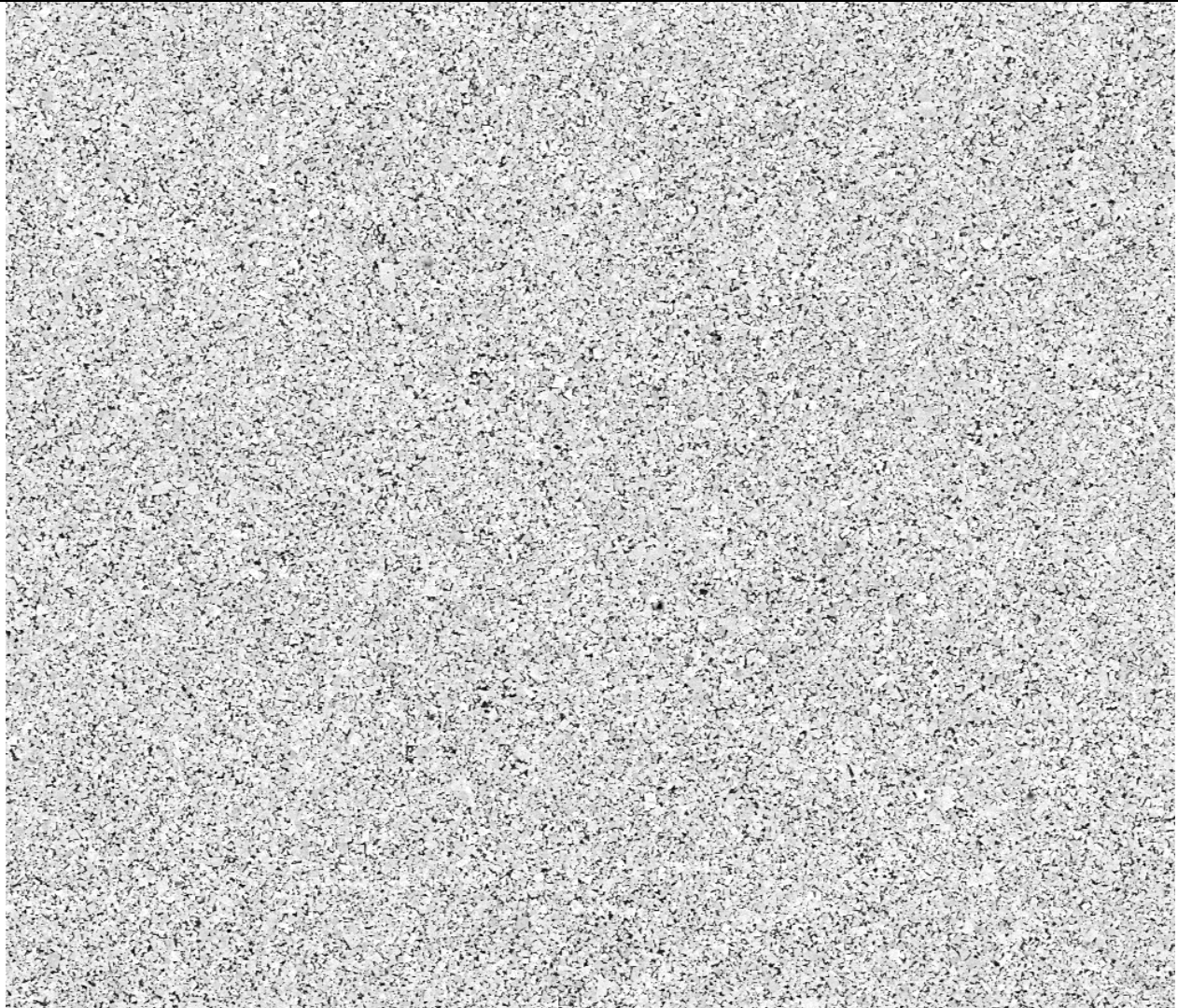
mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	10.2 mm	CEMUP LEITZ	

Leitz



mag	HV	det	mode	WD	2 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	10.2 mm	CEMUP LEITZ	

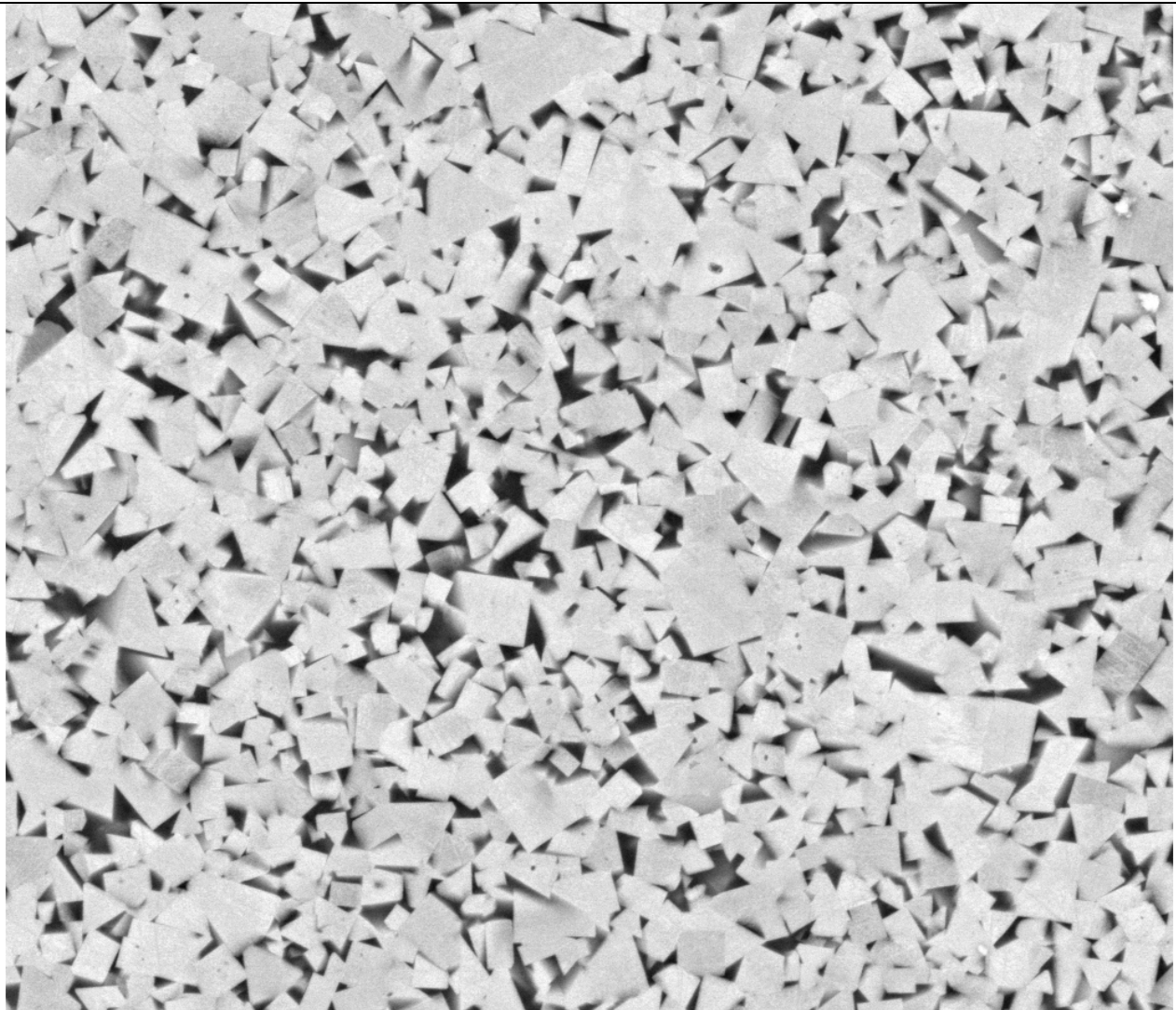
Oertli



mag	HV	det	mode	WD	50 μ m
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.5 mm	

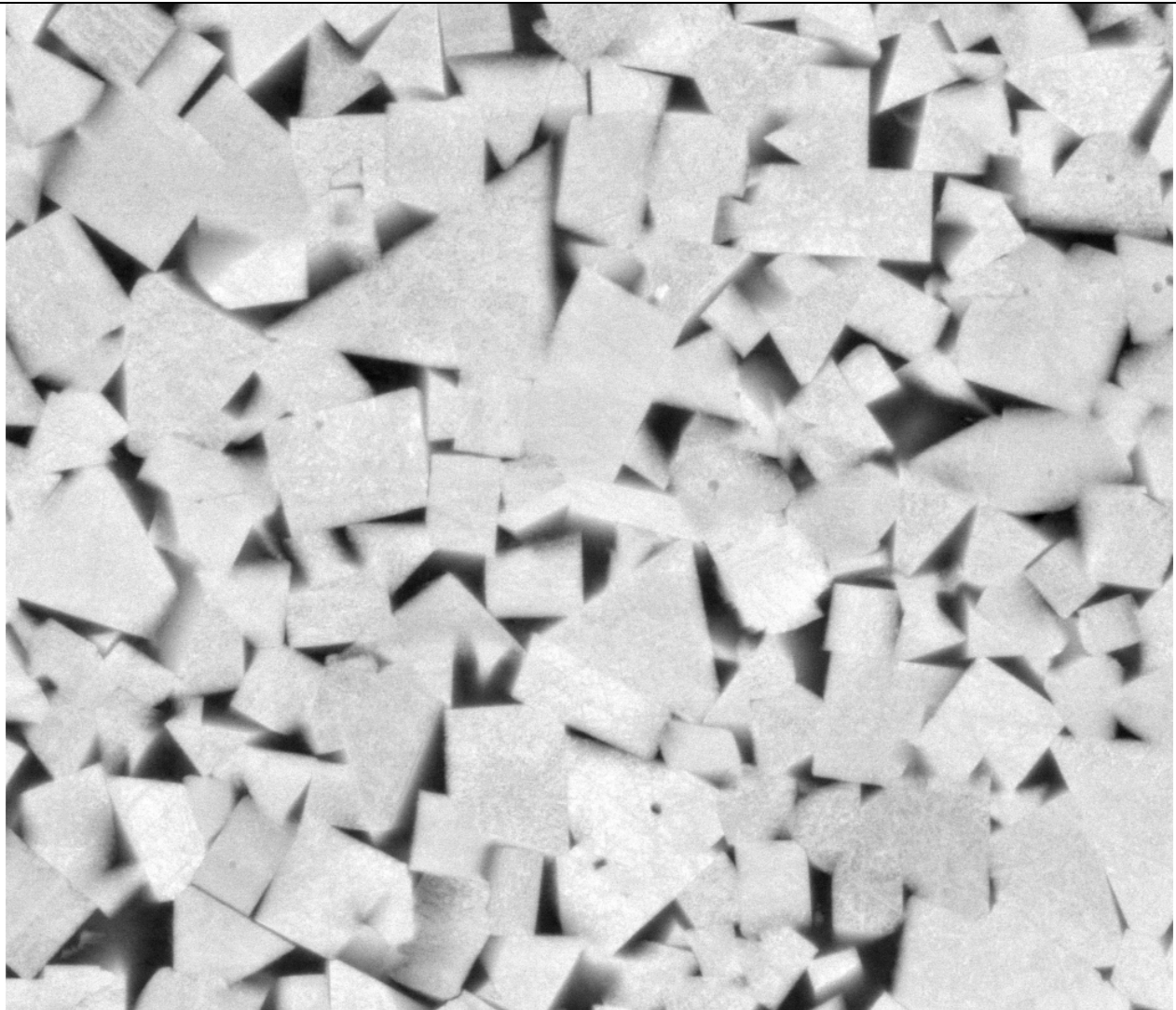
CEMUP OERTLI

Oertli



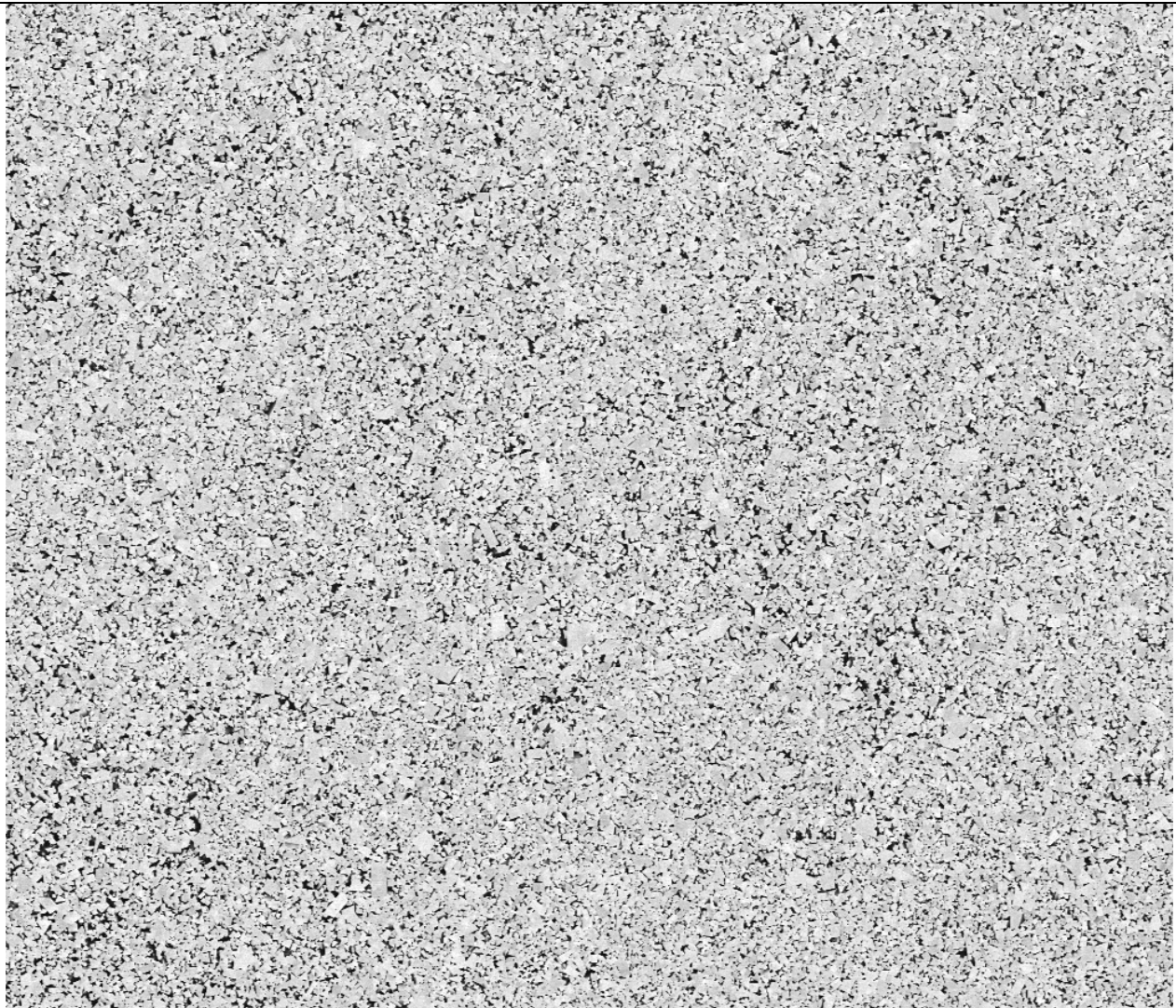
mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.5 mm	CEMUP OERTLI	

Oertli



mag	HV	det	mode	WD	3 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.5 mm	CEMUP OERTLI	

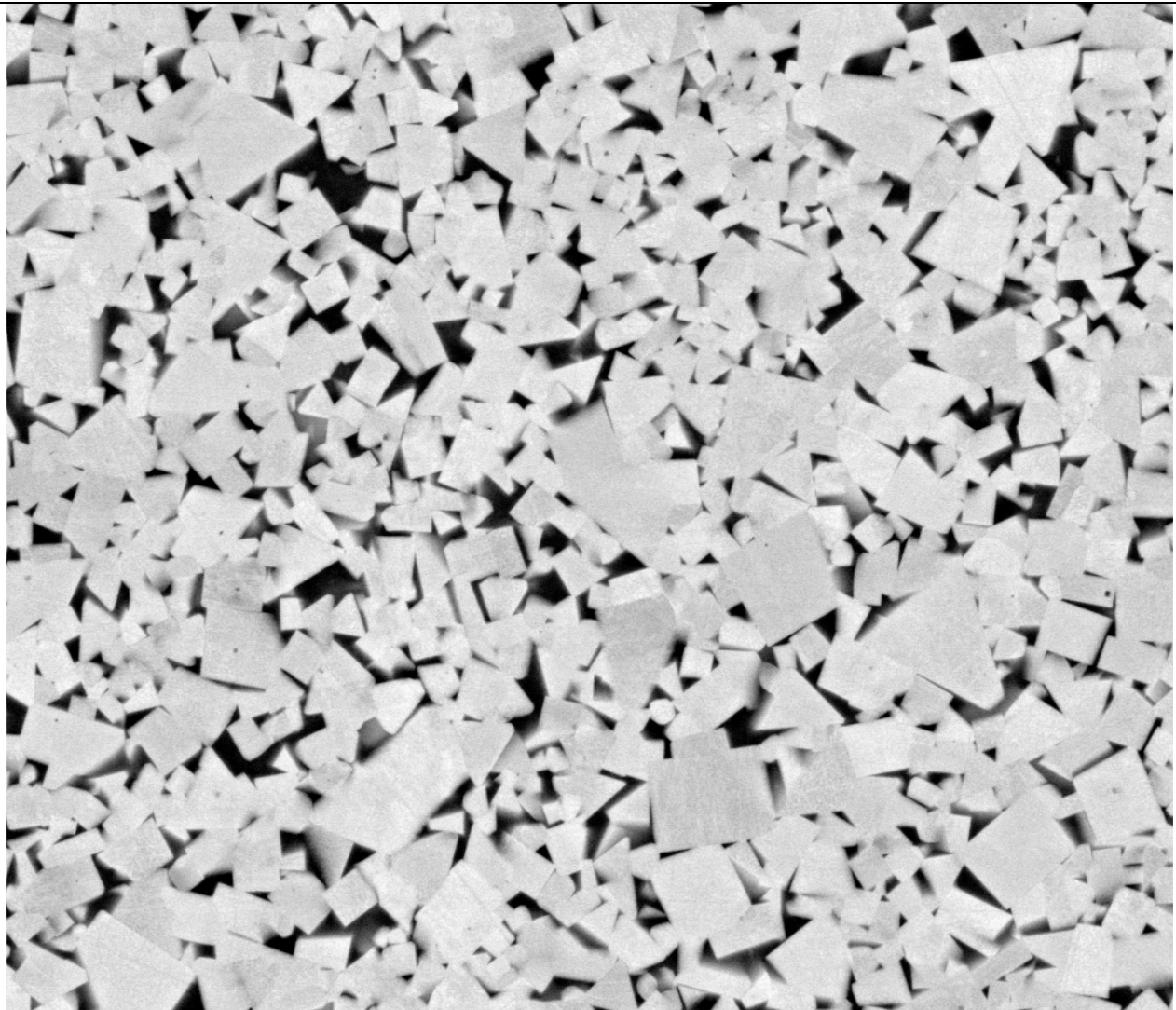
JSO



mag	HV	det	mode	WD	50 μ m
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.2 mm	

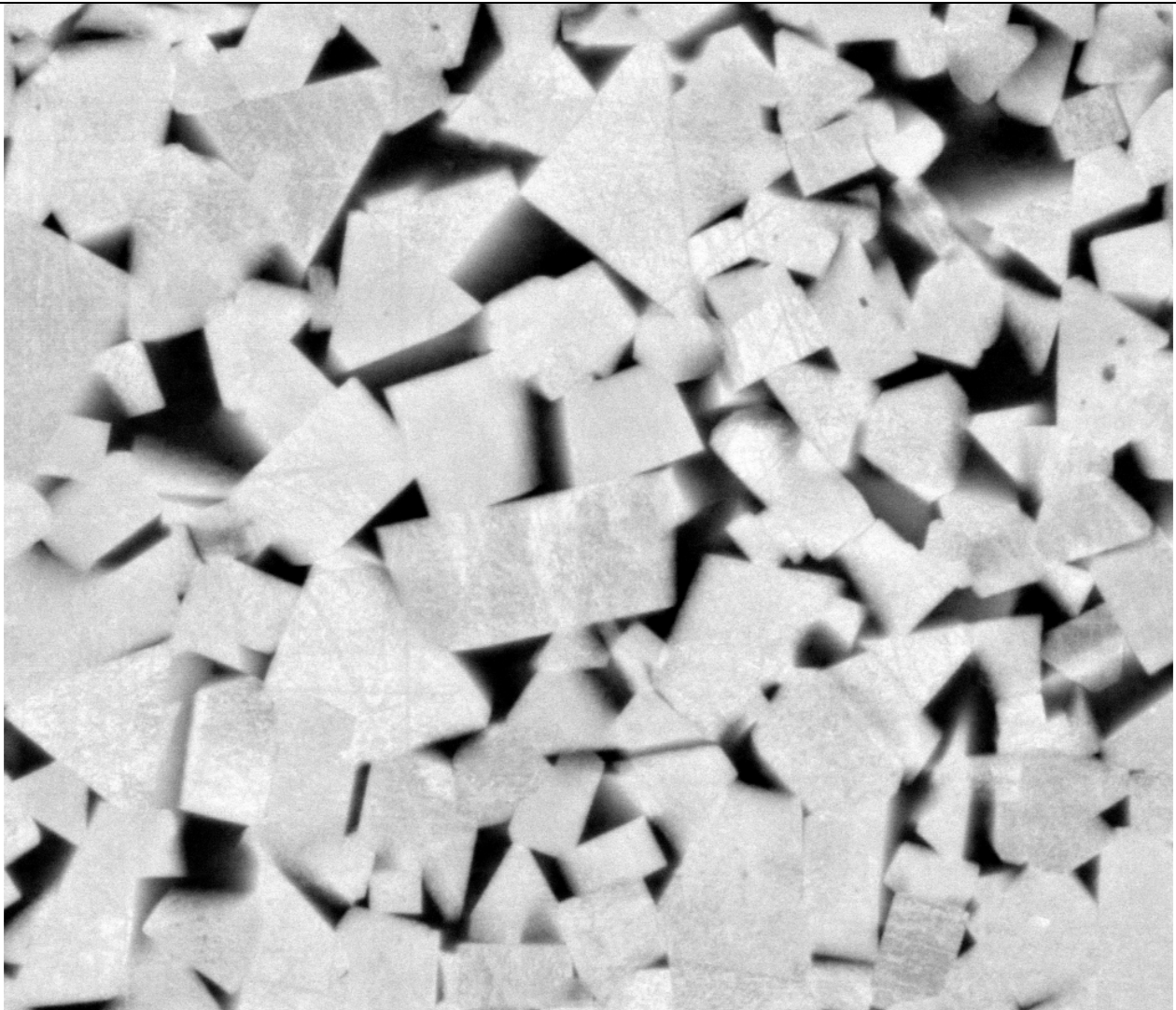
CEMUP JSO

JSO



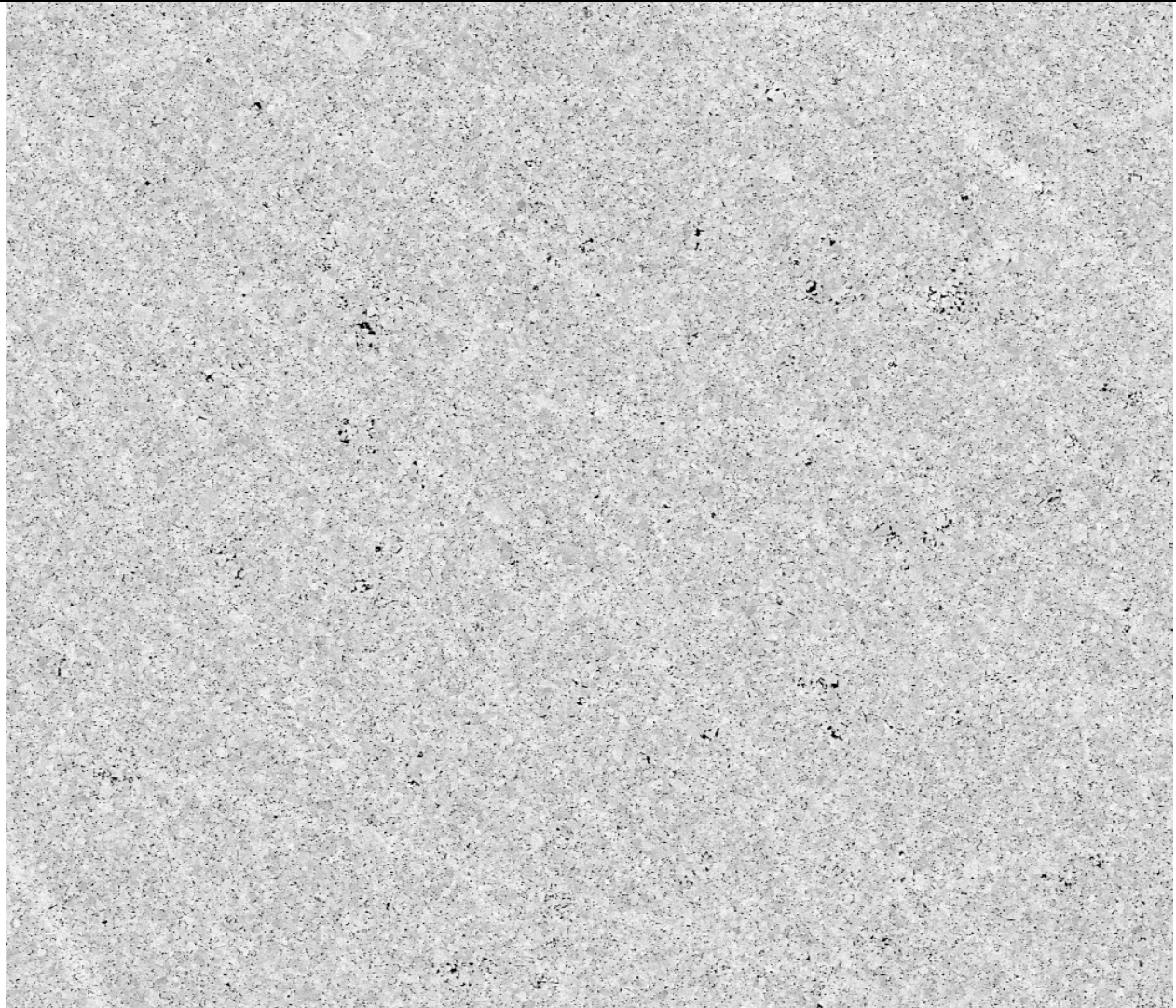
mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.2 mm	CEMUP JSO	

JSO



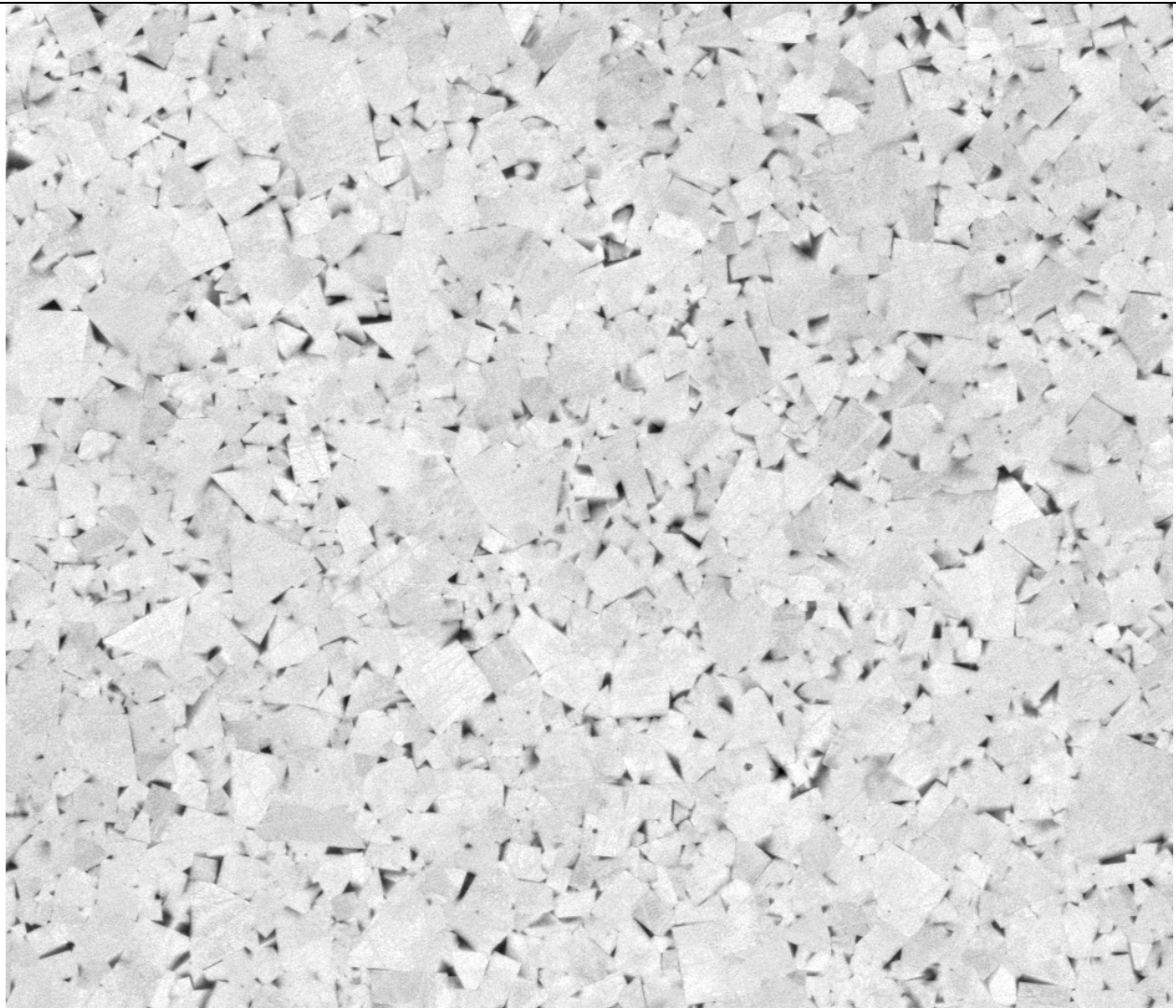
mag	HV	det	mode	WD	3 μ m
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	9.2 mm	CEMUP JSO

CTU06



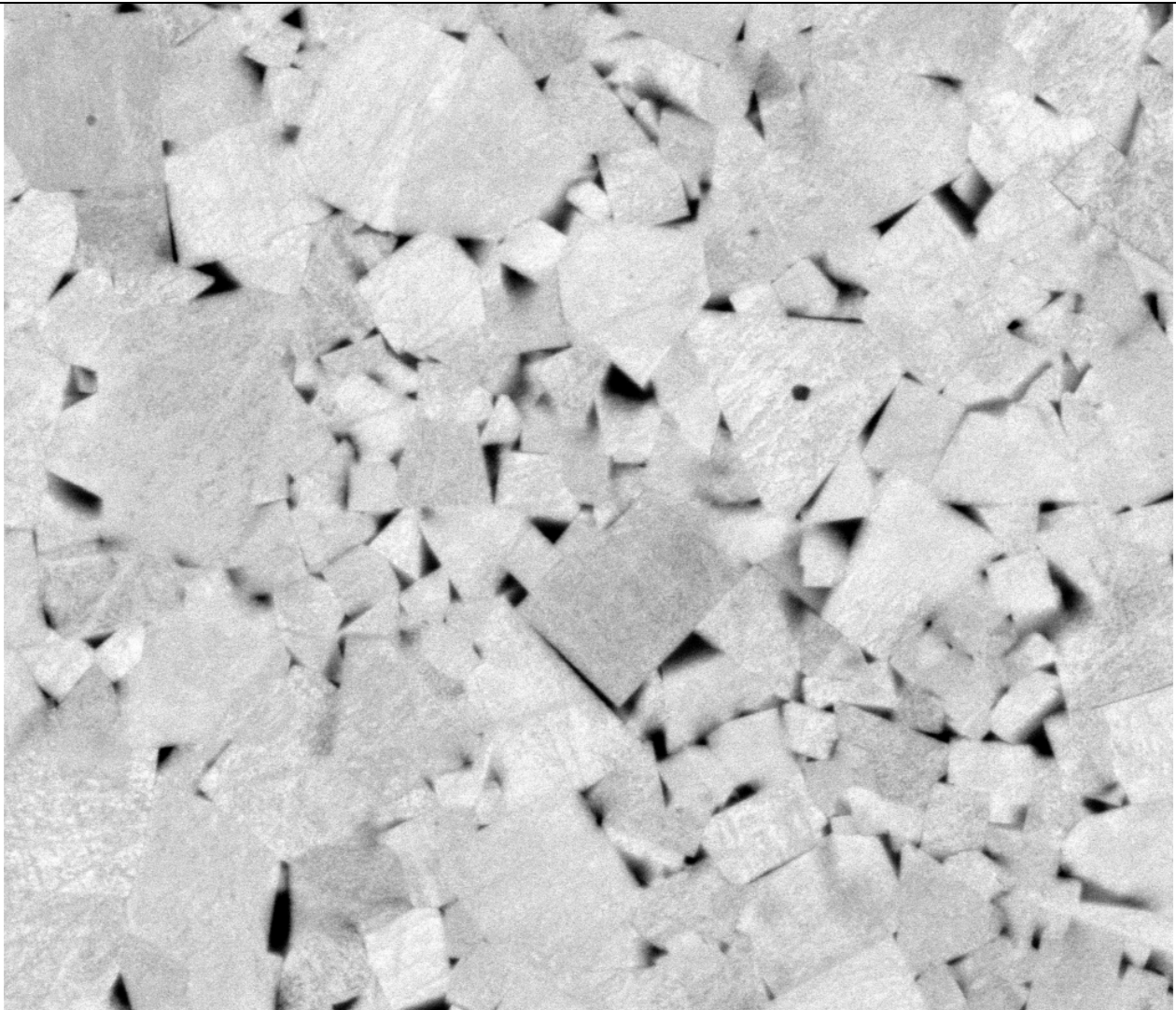
mag	HV	det	mode	WD	50 μ m
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	11.4 mm	CEMUP CTU06

CTU06

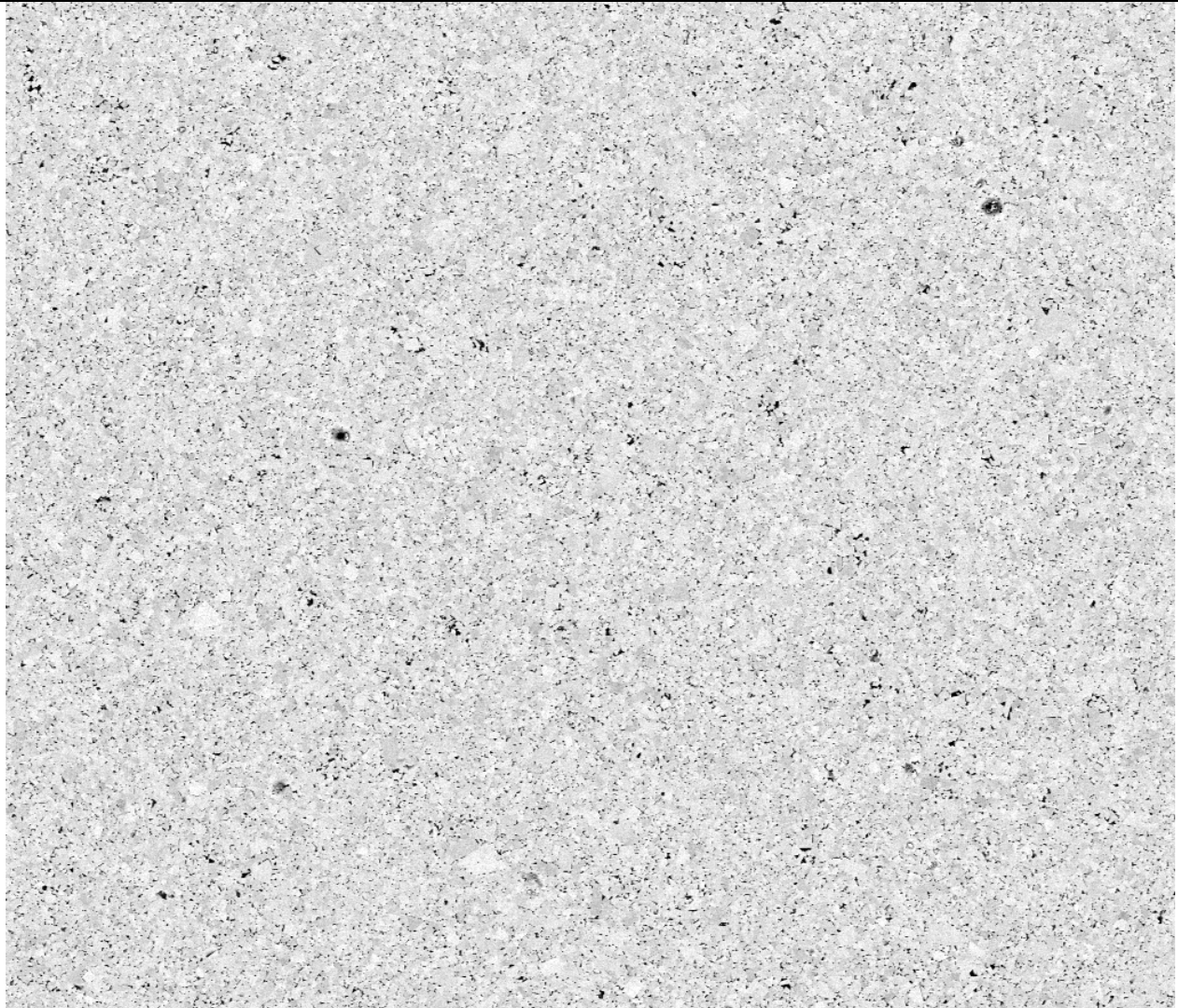


mag	HV	det	mode	WD	5 μ m	
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	11.4 mm	CEMUP CTU06	

CTU06

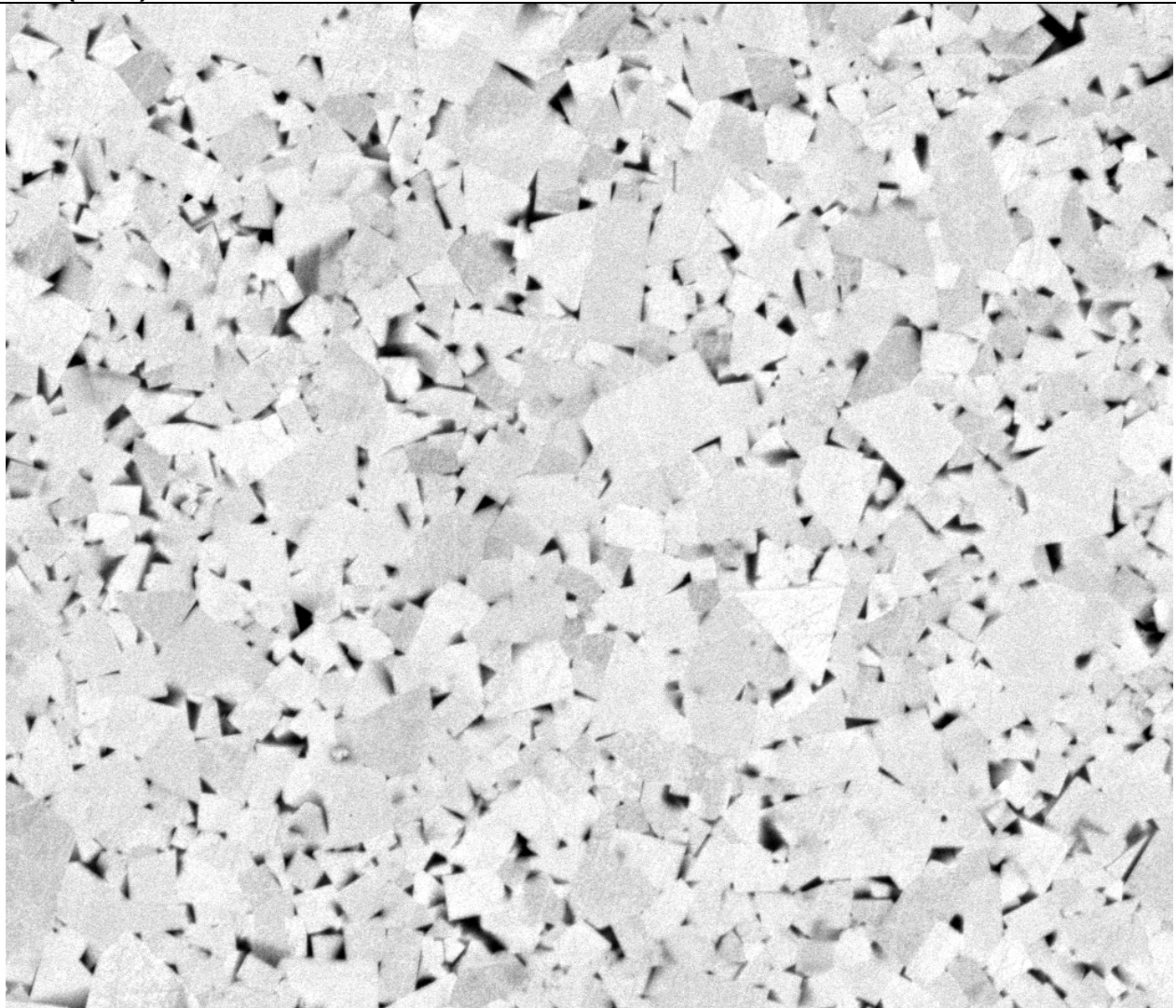


mag	HV	det	mode	WD	2 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	11.4 mm	CEMUP CTU06	

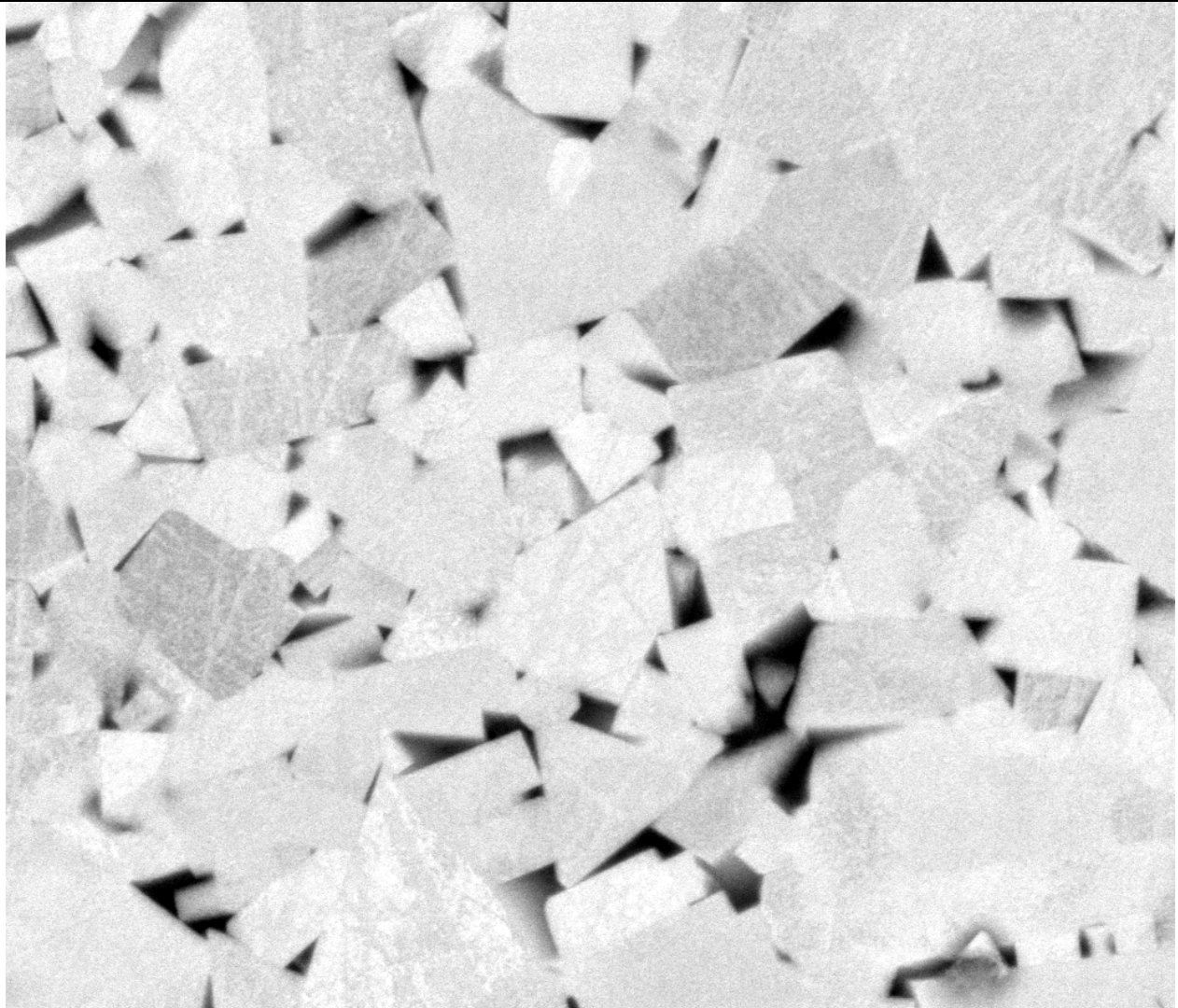
CTS(KCR)06

mag	HV	det	mode	WD	50 μ m
2 500 x	15.00 kV	BSED	A+B	13.5 mm	CEMUP CTS06

CTS(KCR)06



mag	HV	det	mode	WD	5 μ m
20 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	13.5 mm	CEMUP CTS06

CTS(KCR)06

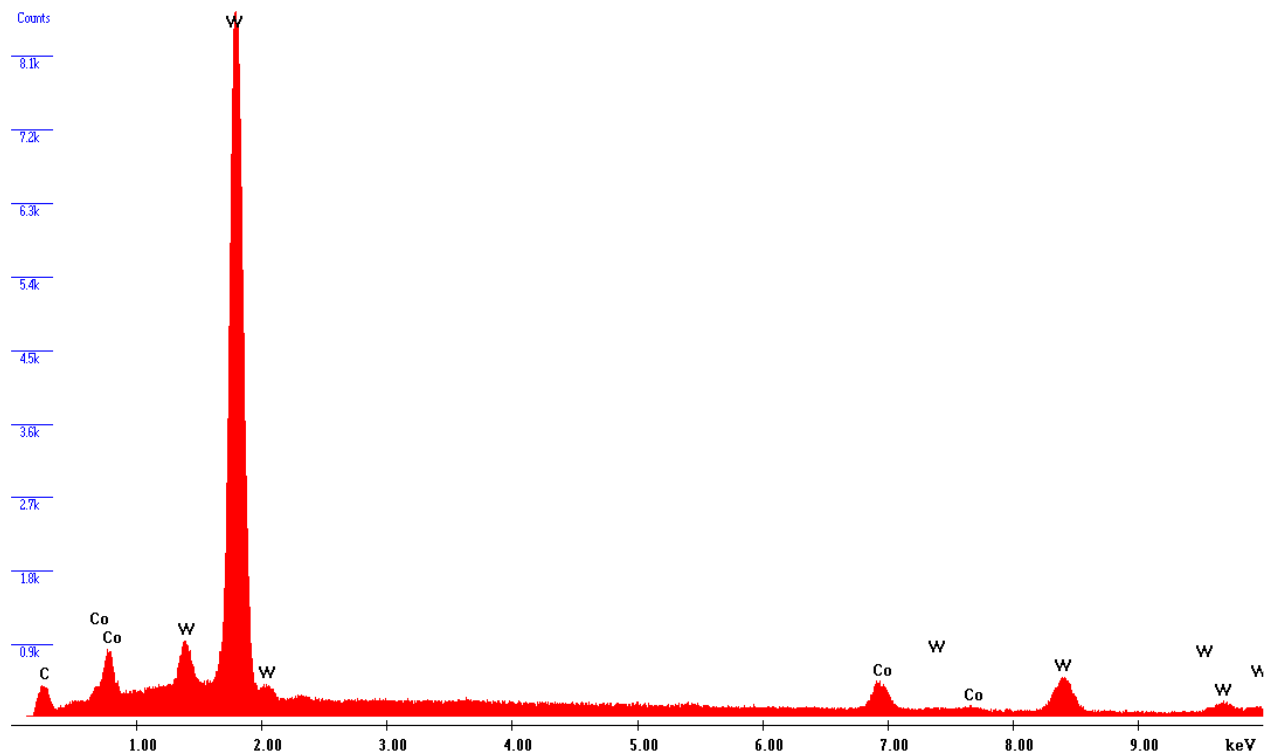
mag	HV	det	mode	WD	2 μ m	
50 000 x	15.00 kV	BSED	A+B	13.5 mm	CEMUP CTS06	

7.3 Espectros de microanálise por Raio-X

Frezite

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\FREZITE_Glb.spc

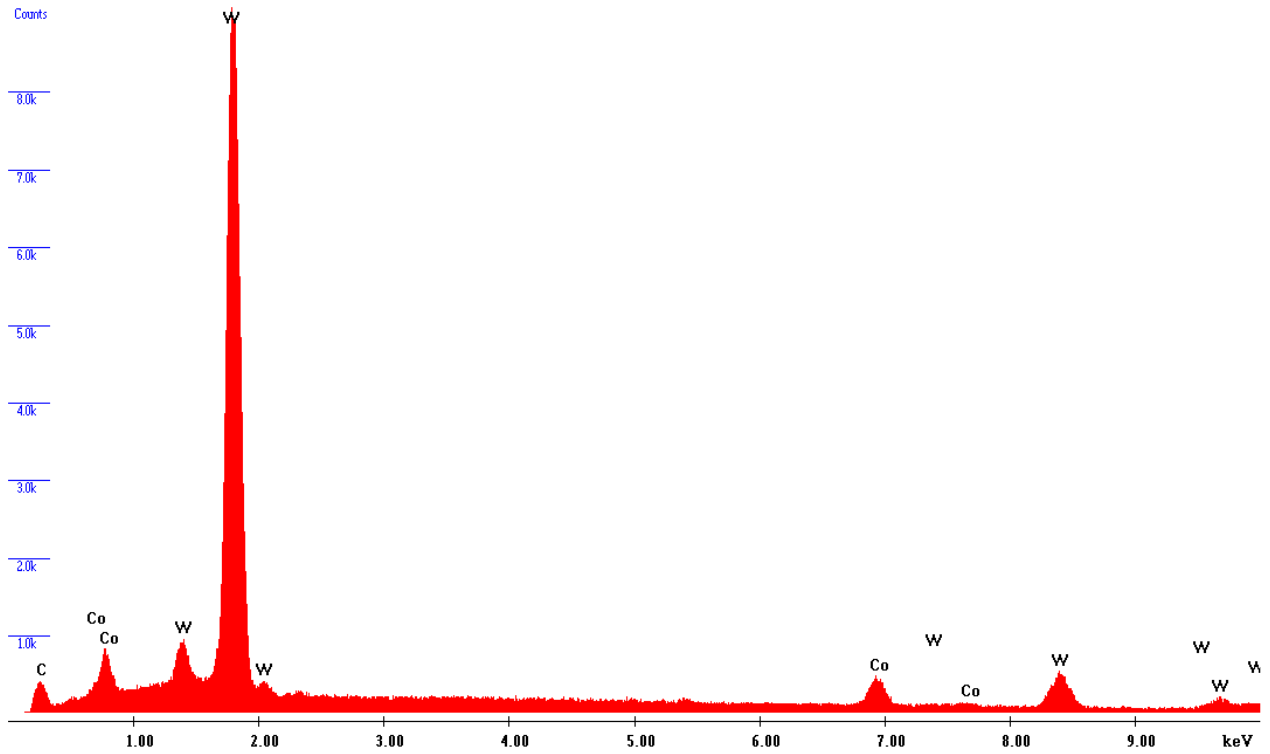
Label A: CEMUP 15KV FREZITE Global



Leuco

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\LEUCO_Glb.spc

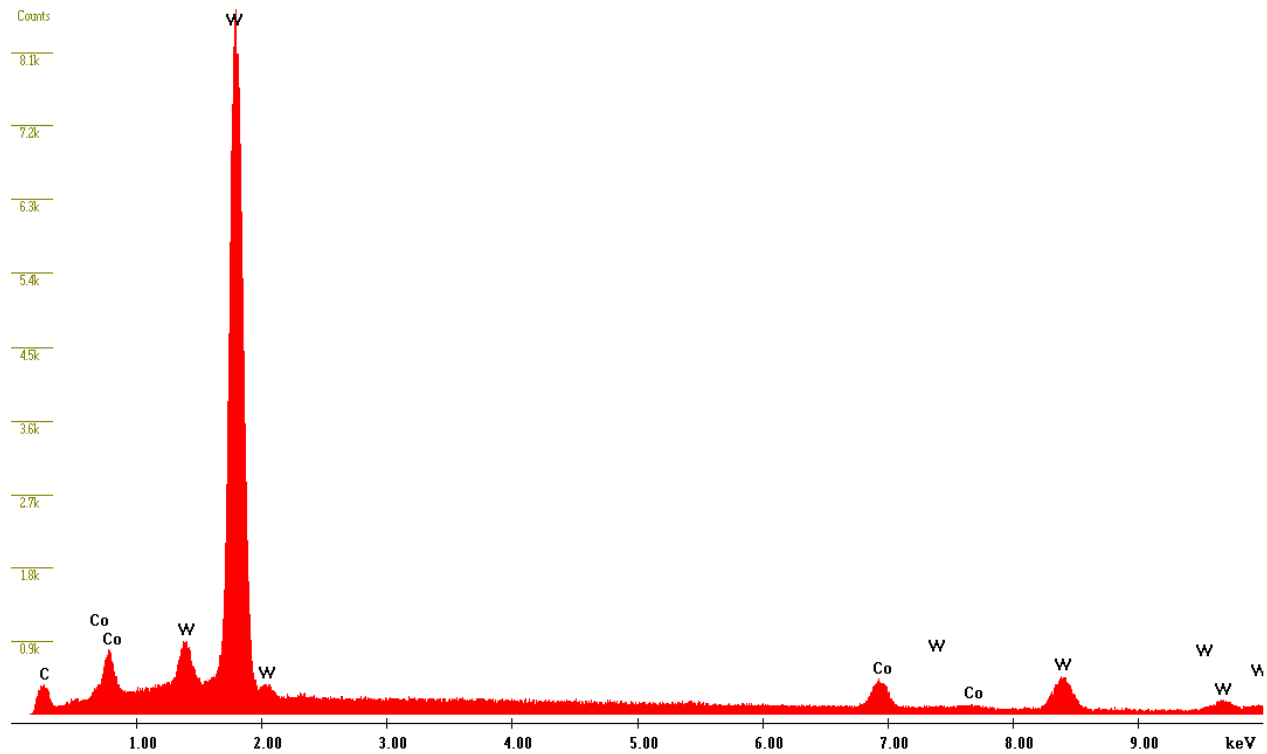
Label A: CEMUP 15kV LEUCO Global



Leitz

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\LEITZ_Glb.spc

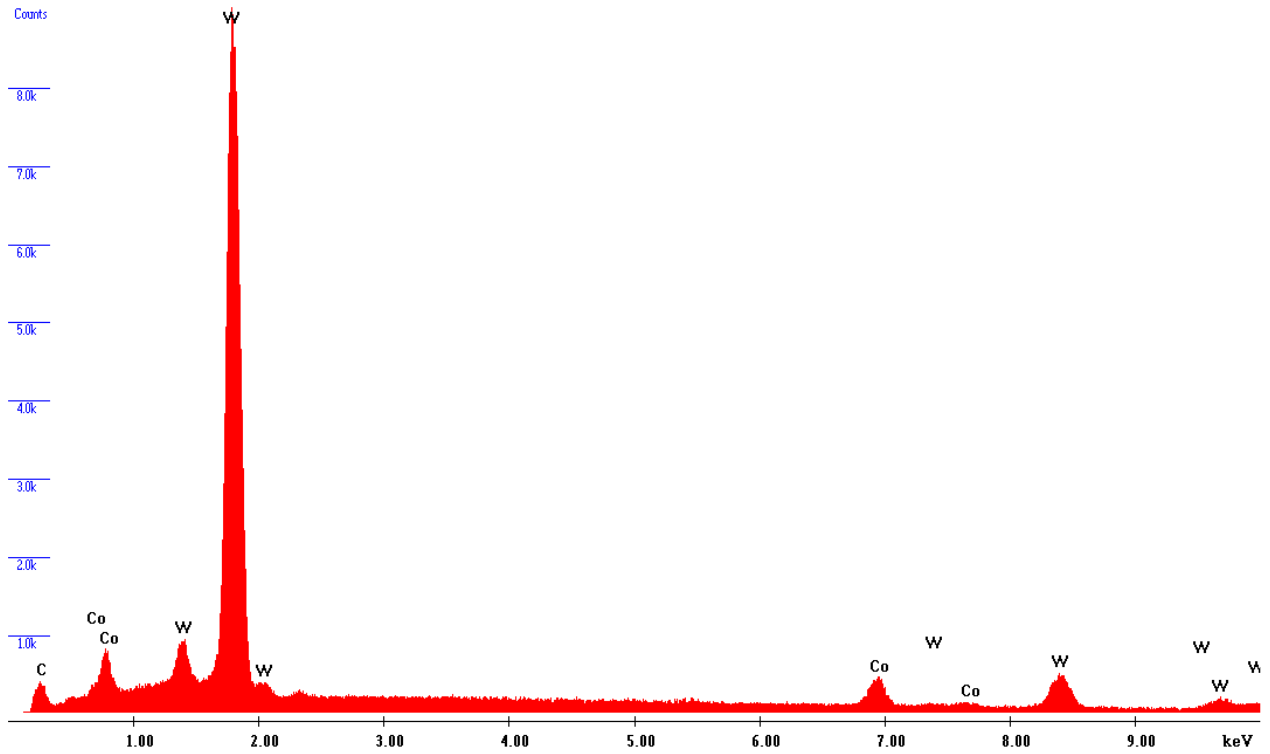
Label A: CEMUP 15kV LEITZ Global



Oertli

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\OERTLI_Glb.spc

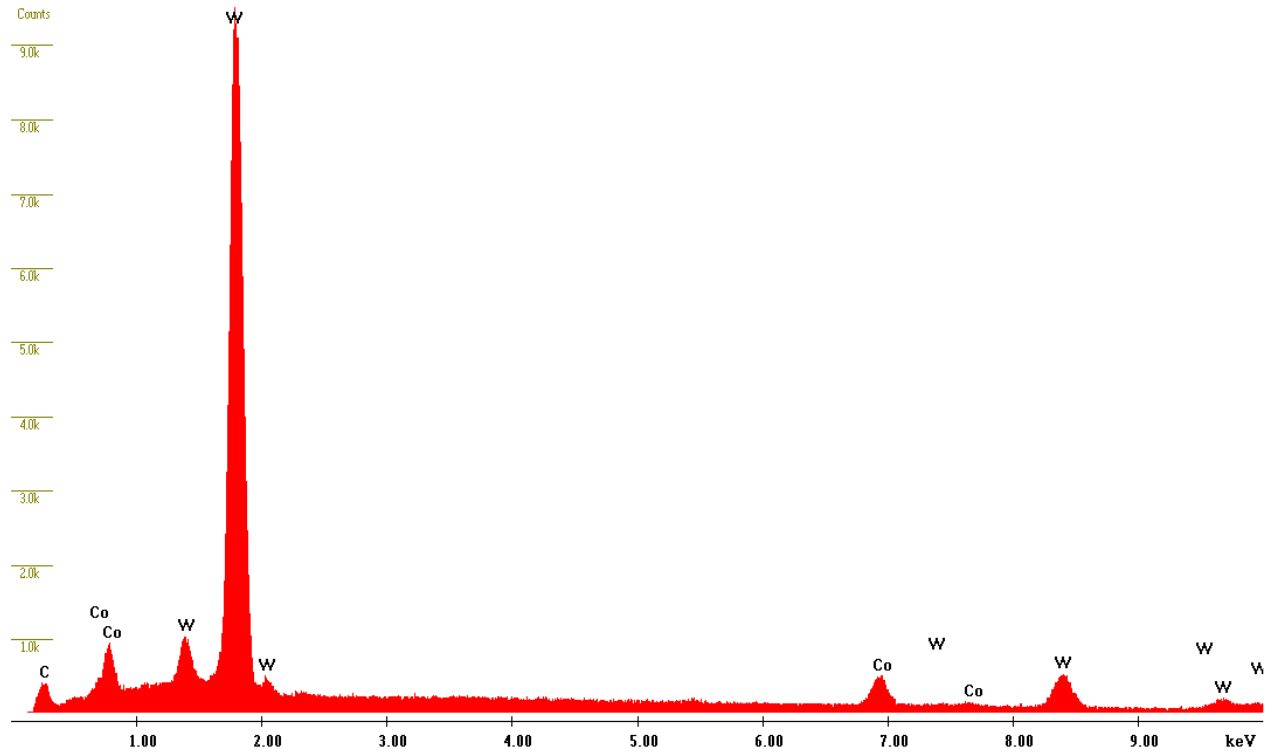
Label A: CEMUP 15KV OERTLI Global



JSO

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\JSO_Glb.spc

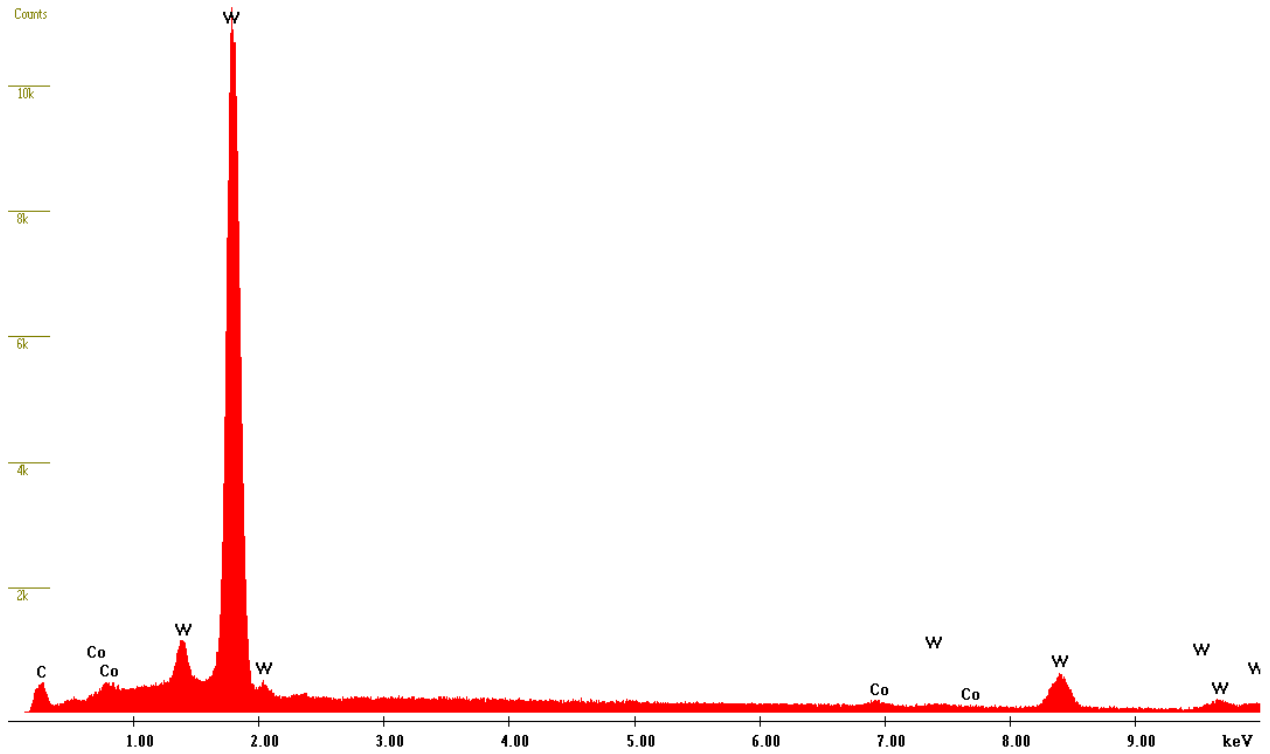
Label A: CEMUP 15kV JSO Global



CTU06

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\CTU06_Glb.spc

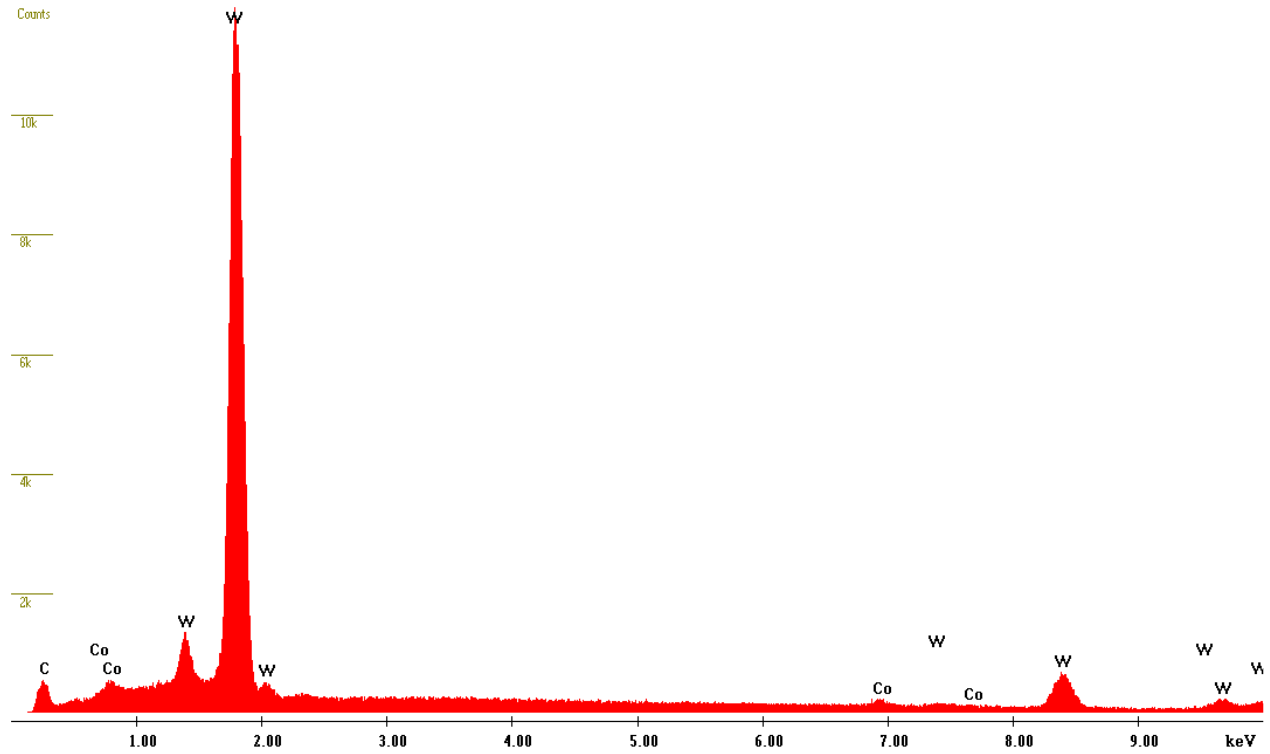
Label A: CEMUP 15kV CTU06 Global



CST(KCR)06

\\Support-d8425\SharedData\20080124, Jorge Lino\EDS\CTS06_Glb.spc

Label A: CEMUP 15kV CTS06 Global



7.4 Distribuição (%) da área de grão por fresa

Área(μ ²)	FREZITE		LEUCO		CTUO6		OERTLI	
	nº	%	nº	%	nº	%	nº	%
0-0.1	27	31,76	20	25,32	24	36,92	16	24,62
0.1-0.2	30	35,29	31	39,24	23	35,38	28	43,08
0.2-0.3	13	15,29	18	22,78	4	6,15	7	10,77
0.3-0.4	7	8,24	3	3,80	3	4,62	6	9,23
0.4-0.5	4	4,71	5	6,33	2	3,08	2	3,08
0.5-0.6	1	1,18	0	0	3	4,62	2	3,08
0.6-0.7	2	2,35	2	2,53	2	3,08	2	3,08
0.7-0.8	1	1,18	0	0	0	0	0	0
0.8-0.9	0	0	0	0	2	3,08	1	1,54
0.9-1.0	0	0	0	0	1	1,54	1	1,54
>1.0	0	0	0	0	1	1,54	0	0
TOTAL	85	100	79	100	65	100	65	100

Área(μ ²)	LEITZ		JSO		CTSO6	
	nº	%	nº	%	nº	%
0-0.1	20	30,77	15	23,08	5	7,14
0.1-0.2	27	41,54	19	29,23	22	31,43
0.2-0.3	9	13,85	15	23,08	14	20,00
0.3-0.4	4	6,15	5	7,69	9	12,86
0.4-0.5	4	6,15	3	4,62	5	7,14
0.5-0.6	1	1,54	3	4,62	5	7,14
0.6-0.7	0	0	3	4,62	4	5,71
0.7-0.8	0	0	0	0	2	2,86
0.8-0.9	0	0	0	0	0	0
0.9-1.0	0	0	1	1,54	0	0
>1.0	0	0	1	1,54	4	5,71
TOTAL	65	100	65	100	70	100

7.5 Registos do ensaio de desgaste (2º ensaio)

		Sinter-Sud			Frezite		
		1	2	3	1	2	3
Ensaio	N.º Rot	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]
1	100	0,000536	0,000580	0,000883	0,000399	0,000791	0,000754
2	200	0,000856	0,001070	0,001038	0,000601	0,001110	0,000673
3	300	0,000649	0,001581	0,002029	0,000947	0,001528	0,000830
4	500	0,001436	0,002534	0,002327	0,001679	0,002108	0,001161
5	700	0,002028	0,002705	0,002853	0,002067	0,002938	0,001426
		CTU 06			CTS 06		
		1	2	3	1	2	3
Ensaio	N.º Rot	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]
1	100	0,000747	0,000373	0,000513	0,000711	0,000169	0,000377
2	200	0,000999	0,000451	0,000790	0,000791	0,000555	0,000396
3	300	0,001406	0,001046	0,001247	0,001007	0,000407	0,000627
4	500	0,001829	0,001169	0,001330	0,001265	0,000694	0,000926
5	700	0,002549	0,001160	0,001940	0,001436	0,000934	0,001110
		Leuco			Leitz		
		1	2	3	1	2	3
Ensaio	N.º Rot	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]
1	100	0,000541	0,000527	0,000741	0,001602	0,000338	0,000622
2	200	0,000711	0,000947	0,001086	0,002674	0,000660	0,000735
3	300	0,001126	0,001426	0,001952	0,002690	0,001426	0,001185
4	500	0,001702	0,002675	0,002488	0,004188	0,001958	0,001783
5	700	0,001939	0,002067	0,002706	0,004747	0,002989	0,002820
		Oertli			JSO		
		1	2	3	1	2	3
Ensaio	N.º Rot	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]	V [mm ³]
1	100	0,000273	0,000649	0,000596	0,000570	0,000586	0,000611
2	200	0,000682	0,001377	0,001135	0,000978	0,000654	0,001161
3	300	0,000816	0,001456	0,001636	0,001487	0,000884	0,001529
4	500	0,001528	0,002356	0,002217	0,002274	0,001302	0,002675
5	700	0,001818	0,003256	0,003641	0,003579	0,001221	0,004031

		Sinter-Sud	Frezite
		Média	Média
Ensaio	N.º Rot	V [mm3]	V [mm3]
1	100	0,000667	0,000648
2	200	0,000988	0,000795
3	300	0,001419	0,001102
4	500	0,002099	0,001650
5	700	0,002529	0,002144
		CTU 06	CTS 06
		Média	Média
Ensaio	N.º Rot	V [mm3]	V [mm3]
1	100	0,000544	0,000419
2	200	0,000747	0,000580
3	300	0,001233	0,000680
4	500	0,001443	0,000962
5	700	0,001883	0,001160
		Leuco	Leitz
		Média	Média
Ensaio	N.º Rot	V [mm3]	V [mm3]
1	100	0,000603	0,000854
2	200	0,000915	0,001356
3	300	0,001501	0,001767
4	500	0,002288	0,002643
5	700	0,002238	0,003519
		Oertli	JSO
		Média	Média
Ensaio	N.º Rot	V [mm3]	V [mm3]
1	100	0,000506	0,000589
2	200	0,001065	0,000931
3	300	0,001303	0,001300
4	500	0,002034	0,002084
5	700	0,002905	0,002944

		N.º Rot				
		100	200	300	500	700
Sinter-Sud	Volume desgastado [mm ³]	0,000667	0,000988	0,001419	0,002099	0,002529
Frezite		0,000648	0,000795	0,001102	0,001650	0,002144
Leuco		0,000603	0,000915	0,001501	0,002288	0,002238
Leitz		0,000854	0,001356	0,001767	0,002643	0,003519
CTU 06		0,000544	0,000747	0,001233	0,001443	0,001883
CTS 06		0,000419	0,000580	0,000680	0,000962	0,001160
Oertli		0,000506	0,001065	0,001303	0,002034	0,002905
JSO		0,000589	0,000931	0,001300	0,002084	0,002944

		Distância de Escorregamento - S [mm]				
		7853,98	15708	23561,9	39269,9	54977,9
Sinter-Sud	Volume desgastado [mm ³]	0,000667	0,000988	0,001419	0,002099	0,002529
Frezite		0,000648	0,000795	0,001102	0,001650	0,002144
Leuco		0,000603	0,000915	0,001501	0,002288	0,002238
Leitz		0,000854	0,001356	0,001767	0,002643	0,003519
CTU 06		0,000544	0,000747	0,001233	0,001443	0,001883
CTS 06		0,000419	0,000580	0,000680	0,000962	0,001160
Oertli		0,000506	0,001065	0,001303	0,002034	0,002905
JSO		0,000589	0,000931	0,001300	0,002084	0,002944

7.6 Medições de rugosidade do 3º conjunto ao longo dos testes em ambiente real (valores médios)

Sinter-Sud 1

		R_a [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,19	0,18	0,20	0,19
Up		0,20	0,16	0,19	0,24
Down		0,08	0,09	0,09	0,09

		R_{max} [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,81	1,25	0,85	1,47
Up		1,51	1,18	1,45	2,17
Down		0,64	1,11	0,64	1,12

		R_z [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,76	0,82	0,77	1,09
Up		1,12	0,93	1,12	1,52
Down		0,44	0,56	0,47	0,63

Frezite 1

		R_a [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,22	0,22	0,22	0,23
Up		0,18	0,17	0,13	0,26
Down		0,09	0,09	0,10	0,17

		R_{max} [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,95	1,62	1,25	1,86
Up		0,92	1,15	0,97	2,39
Down		0,70	0,79	0,79	1,58

		R_z [μm]			
		Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top		0,87	1,04	0,98	1,25
Up		0,71	0,85	0,66	1,69
Down		0,50	0,50	0,57	1,12

CTS06 1 **R_a [μm]**

	Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top	0,05	0,06	0,09	0,07
Up	0,15	0,17	0,15	0,11
Down	0,05	0,09	0,08	0,07

 R_{max} [μm]

	Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top	0,34	0,53	0,48	1,48
Up	0,70	1,29	1,31	0,73
Down	0,46	1,02	1,14	0,55

 R_z [μm]

	Estado 0	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Top	0,31	0,37	0,38	0,64
Up	0,53	0,83	0,81	0,55
Down	0,35	0,58	0,53	0,41